ТОМ 8, №2, 2024 eISSN 2541-9129
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная безопасность / Technosphere Safety

Машиностроение / Machine Building

Химические технологии, науки о материалах, металлургия / Chemical Technologies, Materials Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129

Безопасность техногенных и природных систем

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2017 года)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Том 8, № 2, 2024

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция
в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ).
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	https://bps-journal.ru
Дата выхода в свет	31.05.2024

Safety of Technogenic and Natural Systems

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal (Published Since 2017)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Vol. 8, no. 2, 2024

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The Journal Publishes articles in the following fields of science:

Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
Materials Science (Engineering Sciences)
Fire Safety (Engineering Sciences)
Environmental Safety (Engineering Sciences)
Occupational Safety (Engineering Sciences)

Indexing and Archiving:	RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Name of the Body that registered the publication	Mass Media Registration Certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 Dated Jule, 21, 2016, Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Founder and Publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU).
Periodicity	Quarterly (4 Issues Per Year)
Address of the Founder and Publisher	Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	vestnik@donstu.ru
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	https://bps-journal.ru
Date of Publication	31.05.2024

Editorial Board

Содержание

Contents

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 331.45
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-7-16

Научная статья

Сравнительный анализ крымской и общероссийской динамики производственного травматизма в 2017–2021 годах

EDN: QFKRLH

А.А. Макаричева ✉, **В.М. Ефимова**
Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь, Российская Федерация
✉ anna.makarycheva@gmail.com

Аннотация

Введение. Одним из ресурсов здоровьесбережения работающего населения является совершенствование системы охраны труда и профилактики производственного травматизма (ПТ). Систематические научные исследования в этой области сохраняют актуальность, поскольку поясняют взаимосвязи причин и последствий ПТ в различных сферах экономической деятельности. В последние годы в Республике Крым (РК) не изучались структура и динамика ПТ, не сопоставлялись его показатели. Цель представленной научной работы — сравнительный анализ крымской и общероссийской динамики производственного травматизма за пять лет, в 2017–2021 гг. Новые данные должны стать базой для повышения безопасности производства.

Материалы и методы. Использовались методы систематизации научной литературы по проблеме ПТ. Анализировались и сравнивались статистические данные о состоянии ПТ в РК и Российской Федерации. Результаты графически представлены в виде гистограмм. Кроме того, учтены позиции республики в официальных рейтингах по соблюдению трудового законодательства.

Результаты исследования. Анализ статистики позволил сравнить структуру и динамику показателей ПТ в РК с аналогичными данными в среднем по стране. Выявлены региональные особенности ПТ. В 2017–2021 в стране росло число пострадавших со смертельным исходом в расчете на 1 000 работающих, причем в Крыму проблема стояла острее, чем в среднем по России. По итогам 2021 года самым травмоопасным видом деятельности в Республике Крым было строительство, а в РФ — добыча полезных ископаемых. Относительные показатели производственного травматизма (в расчете на 1 000 работающих) в регионе ниже, чем в среднем по стране. В то же время доля травм со смертельным исходом в Крыму в 1,5–2 раза выше среднероссийской. Самый высокий уровень летального травматизма в Крыму зафиксировали в 2018–2019 гг., что может быть связано с активизацией строительства. Показатели травматизма растут на фоне увеличения затрат на мероприятия по охране труда. При этом в 2021 году объем средств, направленных на охрану труда в Крыму, был примерно в 1,7 раза ниже аналогичного среднероссийского показателя (в расчете на одного работающего).

Обсуждение и заключение. Данные о производственном травматизме в РК целесообразно задействовать для составления научно обоснованных рекомендаций по совершенствованию региональной системы безопасности труда. Результаты отчасти связаны с интеграцией Крыма, даны в сопоставлении с общероссийскими показателями. Это значит, что итоги представленной научной работы можно использовать шире — при формировании стратегии развития охраны труда в новых субъектах РФ.

Ключевые слова: производственный травматизм в Республике Крым, численность пострадавших и погибших на производстве, финансирование мероприятий по охране труда

Благодарности. Авторы благодарят руководителя Управления Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю Балдину О.И. за помощь в подготовке статьи. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Макаричева А.А., Ефимова В.М. Сравнительный анализ крымской и общероссийской динамики производственного травматизма в 2017–2021 годах. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):7–16. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-7-16

Research Article

Comparative Analysis of Occupational Injuries Dynamics in Russia and the Republic of Crimea in 2017–2021

Anna A. Makaricheva ✉, **Valentina M. Efimova**
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
✉ anna.makarycheva@gmail.com

Abstract

Introduction. One of the health-saving resources for the working population is the improvement of the occupational safety system and prevention of occupational injuries (OI). Systematic scientific research in this field remains relevant as it helps to understand the interrelationships between the causes and consequences of OI in different sectors of economic activity. In recent years, there has been a lack of research on the structure and dynamics of OI in the Republic of Crimea (RC), and its indicators have not been compared. The aim of this study was to conduct a comparative analysis of Crimean and all-Russian dynamics of occupational injuries over a five-year period from 2017 to 2021 in order to identify trends and develop strategies for improving production safety.

Materials and Methods. Methods of systematization of scientific literature on the issue of OI were employed. Statistical data on the state of OI in the Republic of Crimea and the Russian Federation were analyzed and compared. The results were graphically presented in the form of histograms. Additionally, the positions of the republic in the official ratings on compliance with labor legislation were taken into consideration.

Results. The analysis of statistics has made it possible to compare the structure and dynamics of OI indicators in the Republic of Crimea with similar data on the national average. Regional differences in occupational injury rates have been identified. In 2017–2021, the number of fatal injuries per 1 000 workers increased in the country, and in Crimea the problem was more acute than in the average for Russia. According to the results for 2021, construction was the most hazardous type of activity in the Crimean region, while mining was the most dangerous one in the Russian Federation. The relative rates of occupational injuries (per 1 000 employees) in the region were lower than the national average. At the same time, the proportion of fatal injuries in Crimea was 1.5–2 times higher than the national average. The highest level of fatal injuries in Crimea was recorded in 2018–2019, likely due to increased construction activity. Injury rates were increasing, while the costs of occupational safety measures were also rising. At the same time, in 2021, the amount of funds allocated to labor protection in Crimea was approximately 1.7 times lower than the similar national average (per employee).

Discussion and Conclusion. It is advisable to use data on occupational injuries in the Republic of Crimea to develop scientifically grounded recommendations for improving the regional occupational safety system. These results are partially influenced by the integration of Crimea and are presented in comparison with all-Russian indicators. Therefore, the findings of this scientific work can be applied more broadly when developing a strategy for labor protection in other regions of the Russian Federation.

Keywords: occupational injuries in the Republic of Crimea, the number of workers injured and killed at work, funding for labor protection measures

Acknowledgements. The authors would like to thank Olga I. Baldina, Head of the Department of the Federal State Statistics Service for the Republic of Crimea and the city of Sevastopol, for the assistance provided during the preparation of this article. The authors would like to express their gratitude to the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For Citation. Makaricheva AA, Efimova VM. Comparative Analysis of Occupational Injuries Dynamics in Russia and the Republic of Crimea in 2017–2021. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):7–16. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-7-16

Введение. Для сохранения трудового потенциала страны необходимы высокий уровень охраны труда (ОТ) и совершенствование профилактических мер, направленных на снижение риска производственного травматизма (ПТ). Систематические научные исследования в этой сфере позволят достичь прогресса в понимании причин и последствий ПТ в различных отраслях экономики.

С 2014 года, после воссоединения Крыма и России, произошли значительные изменения в экономике региона, сформировался новый запрос на исследования показателей ПТ как элемента общероссийской системы ОТ. Материалы по проблематике ОТ, опубликованные до 2014 года, были фрагментарными. Это доказывает актуальность анализа и введения в научный оборот показателей ПТ в Республике Крым (РК). Они необходимы для развития теории и практики производственной безопасности, отражают процессы интеграции отраслей региона в российскую систему ОТ на основе современной нормативной базы.

Многие исследования посвящены анализу отдельных показателей ПТ в наиболее травмоопасных отраслях — строительстве [1], сельском хозяйстве [2], горнодобывающей промышленности [3]. Определяются ключевые факторы происшествий на производстве [4], обсуждаются мероприятия по снижению профессиональных рисков [5]. При этом многие исследователи отмечают проблему искажения статистики ПТ и профессиональных заболеваний в России. Значительная часть производственных травм легкой и средней тяжести не регистрируется [6] и не учитывается, поэтому невозможна достоверная оценка социально-экономического ущерба [7] от таких инцидентов. Во всем мире в сравнительных исследованиях ПТ по отраслям промышленности подчеркивается универсальный характер рисков, а также недооценка количества несчастных случаев (НС) и тяжести их последствий [8]. Исследователи сходятся во мнении, что многогранная природа ПТ в сочетании с меняющимися условиями труда и новыми профессиональными рисками требует постоянного мониторинга и анализа показателей охраны труда.

Особый интерес представляют сравнительные исследования ПТ в новых, развивающихся регионах России, в частности в РК. В первые годы после вхождения республики в состав Российской Федерации Д.У. Абдулгазис [9] и Э.Н. Абильтарова [10] изучали отдельные показатели ПТ на предприятиях и в организациях Крыма. Однако с 2017 года до настоящего времени не исследовалась динамика показателей, не проводился сравнительный анализ. При этом такие изыскания особенно актуальны в условиях заметного роста экономической активности, изменения структуры производственного сектора и внутреннего рынка. Многократный рост темпов производственной деятельности в регионе требует оценки данных по расследованию несчастных случаев, специфике травм (в том числе со смертельным исходом). Важно проанализировать и объяснить факты, выявить общие тенденции, сформировать новые подходы к профилактике нарушений здоровья, связанных с профессиональной деятельностью.

Стоит отметить недостаточную изученность широкого круга вопросов — от анализа динамики ПТ в РК до инновационных подходов к совершенствованию системы профилактики и обучения специалистов. Это указывает на актуальность и востребованность представленного исследования.

Цель работы — провести сравнительный анализ показателей производственного травматизма в Крыму и России за пять лет.

Основные задачи:

– анализ региональной структуры и динамики ПТ в 2017–2021 гг.;

– сравнение показателей ПТ по РК со среднероссийскими;

– обсуждение возможности использования итогов анализа для совершенствования системы ОТ.

Материалы и методы. Использовались методы систематизации научной литературы по проблематике ПТ, а также анализ и сопоставление статистических данных по показателям производственного травматизма в Российской Федерации и Республике Крым. Основой для анализа послужили статистические отчеты Федеральной службы государственной статистики России (Росстат) и Управления Федеральной службы государственной статистики (УФСГС) по Республике Крым и Севастополю за период с 2017-го по 2021 год. Результаты графически представлены в виде гистограмм. Кроме того, принимались во внимание два рейтинга Министерства труда РФ. Первый ранжирует профильные региональные органы исполнительной власти по деятельности в сфере государственного управления охраной труда. Второй определяет позиции Крыма по уровню соблюдения трудового законодательства.

Результаты исследования

1. *Современное состояние производственного травматизма в Российской Федерации и Республике Крым.*

С точки зрения заявленной темы исследования представляет особый интерес период с 2017-го по 2021 год. В это время происходили важные трансформации, обусловленные ростом экономической активности. С 2020 года фиксировалось некоторое ее снижение, что связано с пандемией коронавирусной инфекции и другими обстоятельствами.

Отметим ряд методических ограничений, которые следует учитывать при выполнении этой и аналогичных работ. Во-первых, Росстат, Федеральная служба по труду и занятости (Роструд) и Фонд социального страхования (ФСС) используют различные методики учета несчастных случаев на производстве. Как следствие,

некоторые обобщенные данные не совпадают. Во-вторых, в обозначенный период в регионе частные предприниматели учитывали не все случаи ПТ.

Итак, изучались крымские и общероссийские показатели за 2017–2021 гг., представленные в отчетах Росстата и УФСГС по РК и Севастополю. В анализе учитывались прямые данные о средней численности работников, количестве пострадавших при НС на производстве, в том числе со смертельным исходом. Кроме того, принимался во внимание относительный (на 1 000 работающих) коэффициент количества пострадавших при НС на производстве, в том числе со смертельным исходом. Сведения о финансировании мероприятий по ОТ на предприятиях РК отражают тенденции развития профилактической работы в разных отраслях.

На первом этапе исследования сопоставлялись крымские и среднероссийские показатели ПТ за 2021 год. В 2021 году в РФ Росстат учел[1] 19 977 000 человек, занятых на 158 264 предприятиях из разных сфер экономической деятельности. На 93 % предприятий (147 630) к концу года не фиксировались несчастные случаи. 21 609 человек пострадали с утратой трудоспособности (включая пострадавших со смертельным исходом). Из них 30 % — женщины (6 483). 1 210 человек погибли вследствие тяжелых несчастных случаев. Подавляющее большинство получивших смертельную травму на производстве — мужчины (93 %).

Согласно данным УФСГС по РК и Севастополю[2], в 2021 году В РК 1 475 предприятий подлежали статистическому учету. Из них в 1 400 (95 %) на конец года не фиксировались несчастные случаи. Средняя численность работников этих предприятий — 181 773 человека (9 % всех занятых на производстве в РФ). 124 человека пострадали при НС на производстве с потерей трудоспособности и со смертельным исходом. Из них 42 женщины (34 %). В девяти случаях зарегистрированы смертельные травмы. Все погибшие — мужчины.

Итак, в 2021 году 93 % учтенных предприятий в стране и 95 % в РК не фиксировали несчастные случаи. По отношению к общему числу работающих (в промилле от всех работающих в РК) 0,68 ‰ пострадали с утратой трудоспособности. Соответствующий показатель по стране — 1,08 %.

Учтенные НС с летальным исходом в регионе составили 7,26 % от общего количества пострадавших на производстве. Это выше аналогичных средних показателей в целом по стране (5,60 %). Интегральные показатели производственного травматизма по РК и РФ отличались несущественно, поэтому в рамках представленной работы проводился отдельный анализ ПТ по основным видам экономической деятельности.

Информация Росстата[3] позволяет назвать виды экономической деятельности, самые неблагополучные по количеству работников, погибших в результате НС в 2021 году. В приведенных ниже данных — доля от общего количества пострадавших со смертельным исходом:

– обрабатывающие производства (22,6 %);

– транспортировка и хранение (16,5 %);

– строительство (15,9 %);

– добыча полезных ископаемых (14,8 %);

– сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство (10,2 %).

Численность занятых в различных видах экономической деятельности существенно различается, поэтому для сравнительного анализа ПТ целесообразно использовать относительные показатели в расчете на 1 000 занятых в той или иной сфере. Важно отметить, что в обрабатывающем производстве по всей стране занято около 25 % от средней численности работников, а в добыче полезных ископаемых — всего 5 %, и это влияет на абсолютные показатели ПТ.

Среди признанных травмоопасными видов экономической деятельности в России в 2021 году лидирует добыча полезных ископаемых. Здесь численность пострадавших с потерей трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом составила 1,71 на 1000 работающих при среднем показателе 1,08. На втором месте — сельское и лесное хозяйство (1,61). На третьем — деятельность в области культуры, спорта, организации досуга и развлечений (1,47). На четвертом — строительство (1,35).

В РФ больше всего смертельных исходов из-за несчастных случаев отмечено в сфере добычи ископаемых (0,18 на 1 000 работающих при среднем коэффициенте 0,06). Этот показатель значительно выше среднего также в строительстве (0,15) и сельском хозяйстве (0,11).

В 2021 г. в РК наибольшее количество травмированных в результате НС на предприятиях зарегистрировано в строительстве. Здесь коэффициент ПТ составил 2,72 на 1 000 работающих и в четыре раза превысил средний показатель по региону (0,68). Много пострадавших было в сфере водоснабжения, организации сбора и

[1] *Российский статистический ежегодник. 2022*. Москва: Федеральная служба государственной статистики; 2023. 696 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ejegodnik_2022.pdf (дата обращения: 24.12.2023).

[2] *Производственный травматизм на предприятиях и в организациях Республики Крым*. Управление Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю. URL: https://82.rosstat.gov.ru/folder/27542 (дата обращения: 24.12.2023).

[3] *Производственный травматизм в Российской Федерации в 2021 году*. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения: 24.12.2023).

утилизации отходов (0,94), сельском и лесном хозяйстве (0,88), добыче полезных ископаемых (0,86) и обрабатывающем производстве (0,79). Наибольшее количество травм со смертельным исходом зафиксировано в строительстве и сельском хозяйстве.

В России и Крыму среди причин НС с серьезными последствиями на первом месте — организационные проблемы. Об этом свидетельствуют Результаты мониторинга условий охраны труда[4]. Плохая организация производственных процессов была причиной каждого третьего НС с тяжелыми последствиями, при этом доля таких инцидентов постоянно увеличивается.

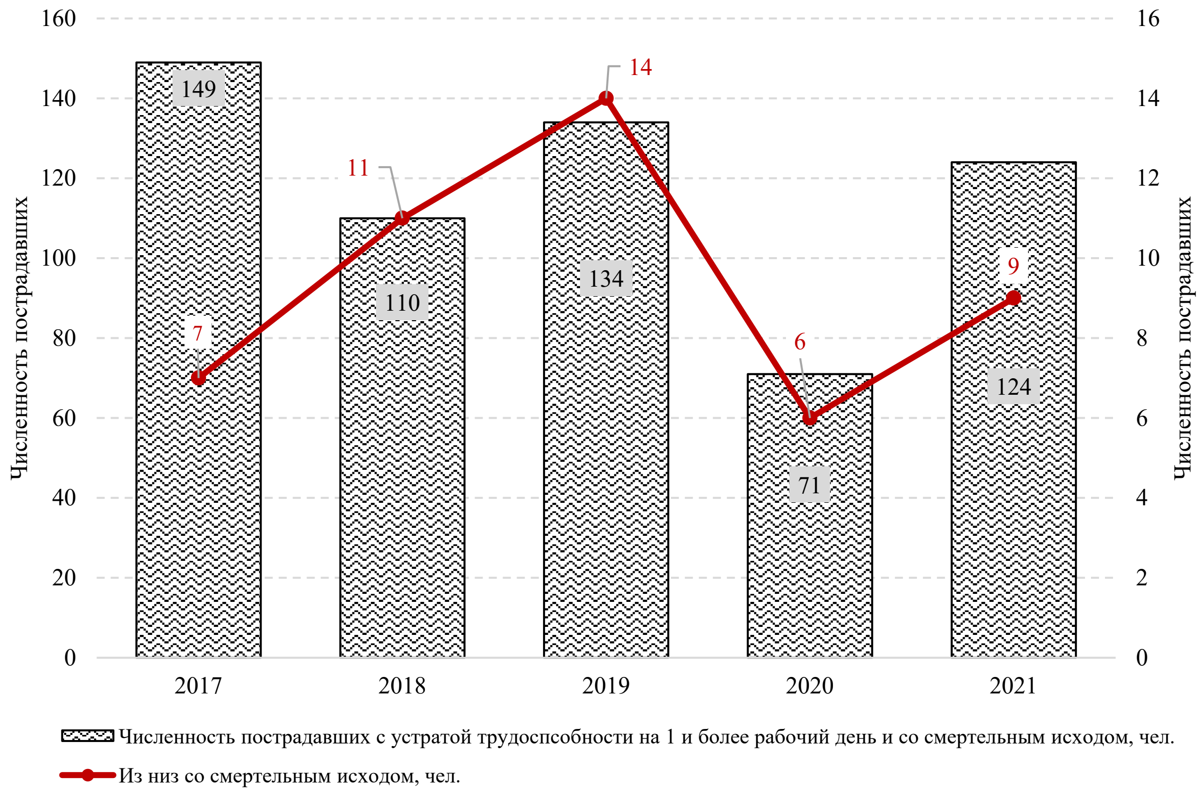
Второстепенные, но значимые факторы производственных травм — нарушения правил дорожного движения, трудовой дисциплины и норм безопасности на рабочем месте. Не менее 7 % НС с серьезными последствиями возникают из-за отклонений от технологического процесса. Другие причины: недочеты в управлении и обучении персонала по охране труда, неудовлетворительное состояние и недостатки в организации рабочих мест, отказ от использования средств индивидуальной защиты. Около четверти всех НС с серьезными последствиями не подлежит однозначной классификации, так как обусловлены обстоятельствами, не связанными напрямую с человеческим фактором.

Таким образом, сопоставление показателей ПТ в РК за 2021 год выявило различия. При анализе основных интегральных данных создается впечатление достаточно благополучной ситуации. Однако диверсификация крымских показателей (в частности, распределение по численности пострадавших на 1 000 занятых) в конкретных видах экономической деятельности указывает на проблемы в обеспечении безопасности и необходимость совершенствования ОТ.

Учитывая масштабы России, для корректного сравнения усредненных показателей по стране и субъекту федерации нужно принимать во внимание многие факторы, включая природу, климат, технологическое развитие региона. Сопоставимые показатели ПТ позволяют выявить области повышенного риска и определить приоритетность мероприятий по охране труда.

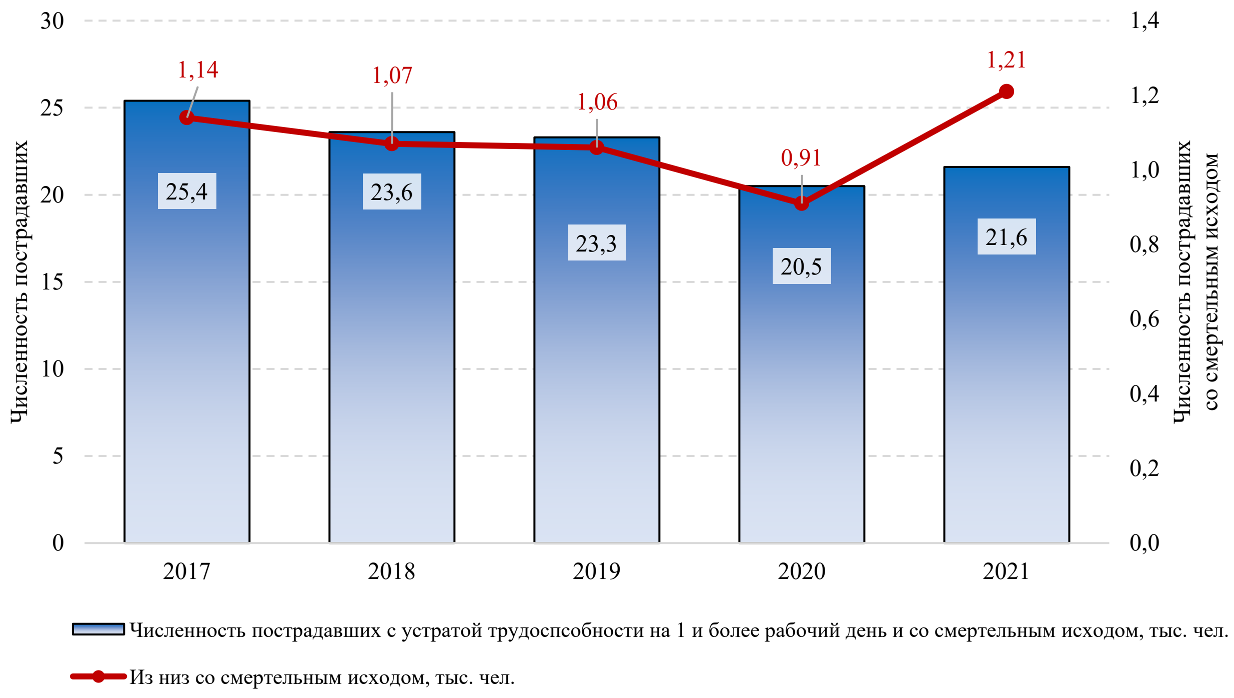
2. *Анализ динамики показателей производственного травматизма в Российской Федерации и Республике Крым в 2017–2021 году.*

Динамика численности пострадавших и погибших на предприятиях РК и РФ в 2017–2021 гг. представлена на рис. 1.



а)

[4] *Результаты мониторинга условий и охраны труда в Российской Федерации в 2021 году.* ВНИИ труда Минтруда России. URL: https://vnii-truda.ru/uploads/researches_file/659e9f020a8e7075635856.pdf (дата обращения: 24.12.2023).



б)

Рис. 1. Динамика показателей производственного травматизма в 2017–2021 гг.:
а — в Республике Крым; *б* — в России

По рис. 1 видно, как изменились основные показатели ПТ за исследованный период. В РК на производственных предприятиях максимальное количество пострадавших при НС зафиксировано в 2017 году — 149 человек. В 2018 году — 110 человек, в 2019-м — 134. Минимум отмечен в 2020 году (71 чел.), однако в 2021-м показатель вырос почти вдвое — до 124.

Похожая динамика у НС со смертельным исходом. Количество летальных травм растет два года, достигает максимума в 2019-м, резко снижается в 2020-м и снова увеличивается в 2021-м (рис. 1 *а*).

В целом по стране количество зафиксированных производственных травм устойчиво сокращалось с 2017 года (25 445 чел.), упало до минимума в 2020-м (20 503) и увеличилось в 2021-м (21 609). При этом количество пострадавших с летальным исходом возросло с 1 140 в 2017 году до 1210 в 2021-м. В 2020-м отмечено наименьшее количество погибших в результате НС на производстве (910, рис. 1 *б*).

В 2017–2021 гг. в РК доля травм с летальным исходом заметно превосходила среднестатистические показатели (рис. 2).

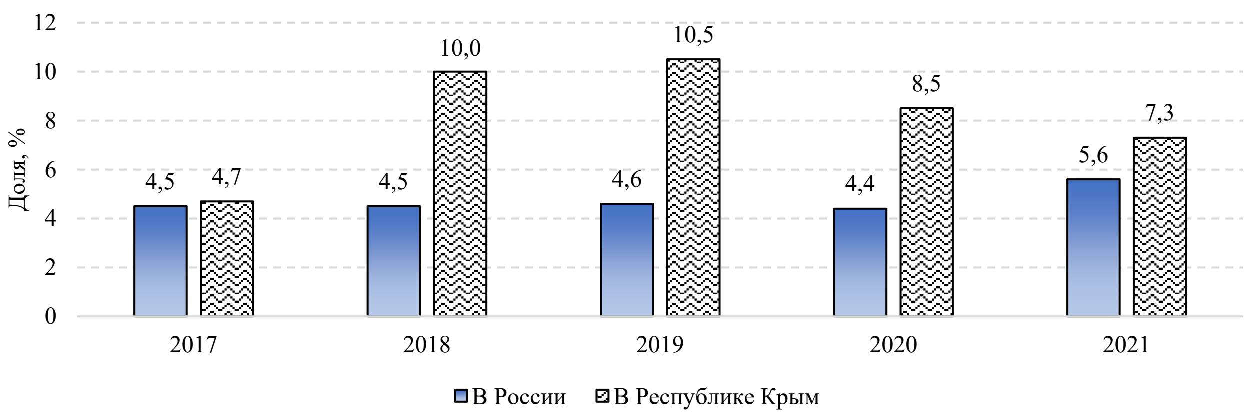


Рис. 2. Доля травм со смертельным исходом в России и Республике Крым в 2017–2021 гг., % от общего числа травм

В 2018–2019 гг. этот показатель в Крыму был максимальным и превышал среднероссийский в 2,2 раза. Вероятно, данный факт связан с ростом объемов строительства — в регионе это самый травмоопасный вид экономической деятельности.

В РФ и Крыму ситуация с ПТ ухудшилась в 2021 году (в сравнении с 2020-м) по трем показателям:

– увеличилось общее количество травм на промышленных предприятиях (на 5 % в РФ и на 75 % в РК);

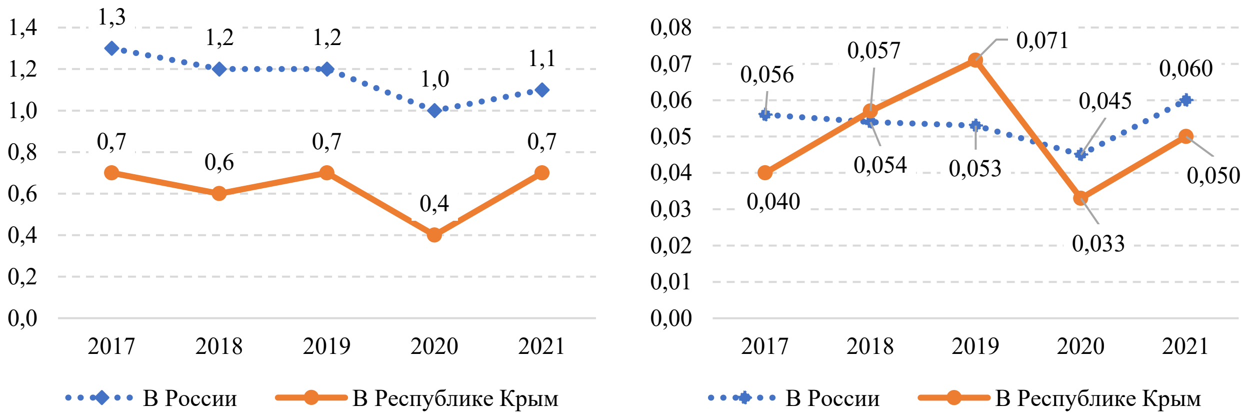
– стало больше смертельных травм (на 33 % в РФ и на 50 % в РК);

– доля травм с летальным исходом выросла в РФ на 27 % и снизилась в Крыму на 14 % (резкий рост общей численности пострадавших сопровождался уменьшением доли пострадавших с летальным исходом).

Высокие показатели роста числа НС в 2021 году можно объяснить низкой базой 2020 года. В 2020-м травматизм резко сократился из-за пандемийных ограничений, которые привели к беспрецедентному снижению экономической активности. Во многих отраслях предприятия полностью или частично не работали.

В целом в России в 2017–2021 гг. уменьшилось на 18 % абсолютное число пострадавших с потерей трудоспособности и летальным исходом. Количество смертельных случаев увеличилось на 6 %. В Крыму число травмированных с потерей трудоспособности тоже сократилось на 18 %. В 2021 году (по сравнению с 2017-м) количество смертей на производстве выросло на 22 %.

Рассмотрим относительные крымские показатели по пострадавшим с утратой трудоспособности и со смертельным исходом (в расчете на 1 000 занятых). В данном случае задействуется информация по видам экономической деятельности, включенным в выборку Росстата. Итак, в 2017-м и 2021 году фиксировался один и тот же показатель — 0,7 на тысячу работников (рис. 3 *а*). Однако количество летальных исходов на тысячу занятых в Крыму увеличилось на 20 %, а в целом по России — только на 6 % (рис. 3 *б*).



а)   *б*)

Рис. 3. Динамика показателей травматизма на 1 000 работающих в Республике Крым и России в 2017–2021 гг.:
а — пострадавшие с утратой трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом;
б — пострадавшие со смертельным исходом

Таким образом, динамика общего количества случаев производственного травматизма в Республике Крым соответствует общероссийской. Однако из сопоставления относительных показателей следует, что фактически уровень ПТ в Крыму за эти годы остался неизменным, а уровень летального травматизма вырос больше, чем в целом по стране (рис. 3). При этом увеличивается финансирование мероприятий по охране труда как в РФ, так и в РК (рис. 4).

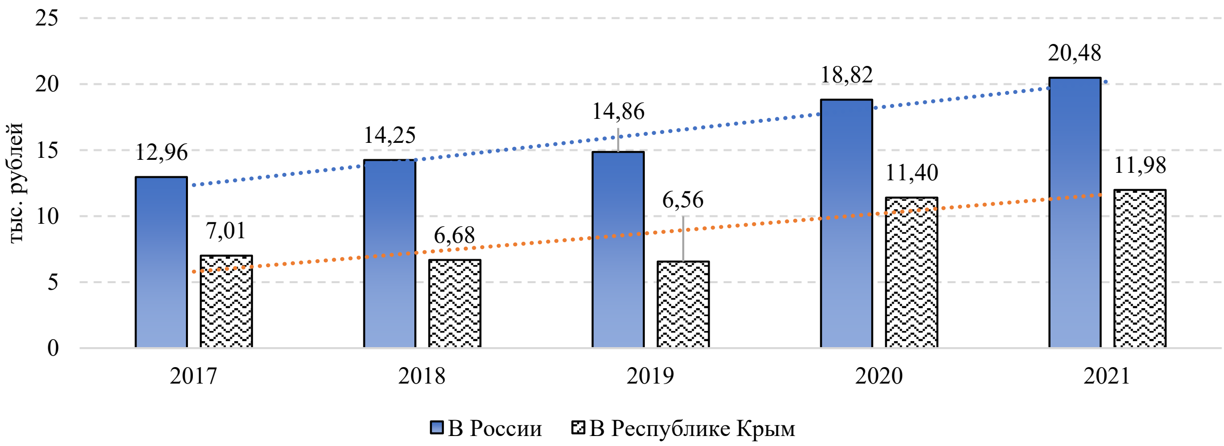


Рис. 4. Динамика объема финансирования мероприятий по охране труда на одного работающего в 2017–2021 гг., тыс. руб.

Как видно из рис. 4, затраты на охрану труда в Крыму выросли на 70 %, с 7 тыс. руб. на одного работающего в 2017 году до 12 тыс. руб. в 2021-м. В целом по России фиксируется прирост на 58 %, с 13 тыс. руб. до 20,5 тыс. руб.

Нетрудно заметить, что объем средств, направленных на охрану труда в Крыму в 2021 году, был примерно в 1,7 раза ниже среднероссийского показателя. Наиболее высокие значения летального травматизма в Крыму фиксировались в 2018 и 2019 гг. В эти же годы была максимальной разница регионального и российского уровней финансирования мероприятий по охране труда. В Крыму на одного работающего потратили в 2,2 раза меньше, чем в среднем по стране. Одно из возможных объяснений — дефицит ресурсов для обеспечения ОТ.

Относительные показатели ПТ (на 1 000 работающих) в регионе заметно ниже, чем в среднем по РФ. Так, в 2021 году в расчете на 1 000 работающих количество пострадавших на производствах РК оказалось меньше на 36 %, а численность пострадавших со смертельным исходом — на 20 % (рис. 3). Однако, по нашему мнению, это обусловлено не столько эффективностью трудоохранных мероприятий, сколько региональной структурой ПТ по видам экономической деятельности. Невысокая численность пострадавших в целом характерна для Южного федерального округа. Это объясняется меньшим числом занятых в промышленности, добыче ископаемых, на обрабатывающих предприятиях. Значительная часть населения южных регионов работает в сфере услуг.

Обсуждение и заключение. Итак, в 2017–2021 гг. увеличилось финансирование мероприятий по охране труда на предприятиях Крыма и России в целом. При этом росли показатели ПТ с летальным исходом, причем в Крыму эта тенденция более выражена, чем в среднем по стране. По-видимому, сфера управления ОТ нуждается в более совершенных методиках оценки эффективности мероприятий. В ежегодном рейтинге субъектов РФ по уровню соблюдения трудового законодательства[5] Республика Крым переместилась с 3-го места в 2017 году на 42-е в 2018-м. В 2019 году регион занял 20-е место. Список составило федеральное Министерство труда. Оно же ранжировало деятельность профильных региональных органов исполнительной власти. В этом перечне по итогам 2021 года Крым оказался на 60-м месте из 85 субъектов РФ.

Безусловно, необходимо углубленно изучить и проанализировать проблемы профилактики ПТ на стройках Крыма. Об этом говорит почти двукратное превышение численности пострадавших в результате несчастных случаев в строительной отрасли РК по сравнению со среднероссийским показателем.

Наибольшее количество травм со смертельным исходом фиксируется в строительстве и сельском хозяйстве республики. Следовательно, в данных секторах необходимы более эффективные трудоохранные мероприятия, более совершенные методы предотвращения несчастных случаев на производстве и адекватные индикаторы оценки динамики ПТ [11].

В целом, итоги представленной работы свидетельствуют о позитивных изменениях в обеспечении производственной безопасности в РК. Открываются перспективы дальнейшего исследования и прикладного применения полученных данных. Их можно использовать для разработки маркеров производственной безопасности, инструментов прогноза и анализа безопасности труда на региональном и общероссийском уровне. Междисциплинарный подход к проблеме производственного травматизма откроет перспективы для продвижения новых методов предотвращения несчастных случаев на производстве.

Одним из направлений совершенствования профилактики ПТ в регионе является развитие непрерывного образования в сфере охраны труда, подготовки и переподготовки специалистов в средних профессиональных и высших учебных заведениях [12]. Полученные сведения о показателях травматизма в разных отраслях региональной экономики могут быть включены в учебные программы по дисциплинам «Безопасность жизнедеятельности» и «Охрана труда».

Сложившаяся динамика отчасти связана с интеграцией Крыма после 2014 года. Показатели даны в сопоставлении с общероссийскими. Логично предположить, что итоги представленной научной работы можно использовать шире — при формировании стратегии развития охраны труда в новых субъектах РФ.

Список литературы / References

1. Пушенко С.Л., Гапонов В.Л., Кукареко В.А. Анализ производственного травматизма в строительной индустрии и пути его снижения. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;(2):24–30. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-24-30

Pushenko SL, Gaponov VL, Kukareko VA. Analysis of Occupational Injuries in the Construction Industry and Ways to Reduce it. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2022;(2):24–30. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-24-30

2. Попов С.В., Щеняев В.И. О проблемах безопасности труда в сельскохозяйственном секторе экономики на современном этапе развития отрасли. *Вестник аграрной науки Дона*. 2021;3(55):76–85.

[5] *Рейтинг органов исполнительной власти по труду субъектов Российской Федерации по осуществлению государственного управления охраной труда.* Минтруд России. URL: https://eisot.rosmintrud.ru/formirovanie-rejtinga-sub-ektov-rossijskoj-federatsii-po-urovnyu-soblyudeniya-trudovogo-zakonodatelstva-i-bazy-obraztsov-luchshej-praktiki1 (дата обращения: 24.12.2023).

Popov SV, Schenyaev VI. On Problems of Labor Safety in the Agricultural Sector of the Economy at the Current Stage of the Industry Development. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2021;3(55):76–85. (In Russ.).

3. Меркулова А.М., Чавкина Л.Ю. Анализ промышленной безопасности в горно-металлургическом комплексе. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;(S14):88–97. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-14-88-97

Merkulova AM, Chavkina LYu. Industrial Safety Analysis in the Mining and Metallurgical Complex. *Mining informational and analytical bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020;(S14):88–97. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-14-88-97 (In Russ.).

4. Кондратьева О.Е., Локтионов О.А., Васильева Н.В., Мирошниченко Д.А., Ефремова А.С. Производственный травматизм: анализ основных причин и перспектив снижения. *Безопасность труда в промышленности.* 2023;(8):40–46. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-8-40-46

Kondrateva OE, Loktionov OA, Vasileva NV, Miroschnichenko DA, Efremova AS. Occupational Injuries: Analysis of the Main Causes and Prospects for Reduction. *Occupational Safety in Industry.* 2023;(8):40–46. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-14-88-97 (In Russ.).

5. Гонтаренко А.Ф., Кловач Е.В., Цирин И.В. Производственный травматизм и инновации в обучении по охране труда. *Безопасность труда в промышленности.* 2022;(3):84–92. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-3-84-92

Gontarenko AF, Klovach EV, Tsirin IV. Occupational Injuries and Innovations in the Occupational Safety Training. *Occupational Safety in Industry.* 2022;(3):84–92. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-3-84-92 (In Russ.).

6. Тихонова И.Г., Чуранова А.Н. Многолетний анализ особенностей учета несчастных случаев на производстве в России. *Демографическое обозрение.* 2019;6(2):142–164.

Tikhonova IG, Churanova AN. Long-Term Analysis of the Features of Occupational Injury Recording and Reporting in Russia. *Demographic Review.* 2019;6(2):142–164. (In Russ.).

7. Малаян К.Р., Фаустов С.А. К вопросу о статистике производственного травматизма. *Безопасность жизнедеятельности*. 2020;8:3–9.

Malajan KR, Faustov SA. On the Issue of Occupational Injures Statistics. *Life Safety*. 2020;8:3–9. (In Russ.).

8. Sang D Choi, Liangjie Guo, Jaehoon Kim, Shuping Xiong. Comparison of Fatal Occupational Injuries in Construction Industry in the United States, South Korea, and China. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2019;(71):64–74. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.02.011

9. Абдулгазис Д.У. Анализ динамики производственного травматизма на предприятиях и в организациях Республики Крым. *Ученые записки Крымского индустриально-педагогического университета*. 2018;(2(160)):196–200.

Abdulgazis DU. Evaluation of the Dynamics of Production Traumatism at Enterprises and in Organizations of the Republic of Crimea. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. 2018;(2(160)):196–200. (In Russ.).

10. Абильтарова Э.Н. Культура безопасности как один из методов профилактики производственного травматизма. *Строительство и техногенная безопасность*. 2018;13(65):169–176.

Abiltarova EN. Safety Culture as One of the Methods of Preventing Industrial Injuries. *Construction and Industrial Safety*. 2018;13(65):169–176. (In Russ.).

11. Макаричева А.А., Ефимова В.М. Показатели производственного травматизма в сельском, лесном хозяйстве, охоте, рыболовстве и рыбоводстве Республики Крым. *Вестник аграрной науки Дона*. 2023;16(2(62)):77–88. https://doi.org/10.55618/20756704_2023_16_2_77-88

Makaricheva AA, Efimova VM. Indicators of Occupational Injuries in Agriculture, Forestry, Hunting, Fishing and Fish Farming of the Republic of Crimea. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2023;16(2(62)):77–88. https://doi.org/10.55618/20756704_2023_16_2_77-88 (In Russ.).

12. Ефимова В.М., Грибенко Е.Н. Вопросы промышленного травматизма и профессиональных заболеваний в профессиональной подготовке студентов. *Проблемы современного педагогического образования.* 2014;44(1):54–60.

Efimova VM, Gribenko EN. Issues of Industrial Injuries and Occupational Diseases in the Professional Training of Students. *Problems of Modern Pedagogical Education.* 2014;44(1):54–60. (In Russ.).

Об авторах:

Анна Алексеевна Макаричева, кандидат биологических наук, доцент кафедры валеологии и безопасности жизнедеятельности Института «Таврическая академия» Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (295007, РФ, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4), SPIN-код: 2766-1037, ORCID, ScopusID, anna.makarycheva@gmail.com

Валентина Михайловна Ефимова, доктор педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой валеологии и безопасности жизнедеятельности Института «Таврическая академия» Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (295007, РФ, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, 4), SPIN-код: 6288-3191, ORCID, ResearcherID, efi56@bk.ru

Заявленный вклад авторов:
А.А. Макаричева — формирование основной концепции, анализ статистических данных, подготовка текста и рисунков, формулирование выводов.
В.М. Ефимова — научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 28.02.2024
Поступила после рецензирования 19.03.2024
Принята к публикации 26.03.2024

About the Authors:
Anna A. Makaricheva, Cand.Sci. (Biol.), Associate Professor of the Valeology and Life Safety Department, Taurida Academy Institute, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4, Prospekt Vernadskogo, Simferopol, 295007, RF), SPIN-code: 2766-1037, ORCID, ScopusID, anna.makarycheva@gmail.com

Valentina M. Efimova, Dr.Sci. (Pedagog.), Head of the Valeology and Life Safety Department, Taurida Academy Institute, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4, Prospekt Vernadskogo, Simferopol, 295007, RF), SPIN-code: 6288-3191, ORCID, ResearcherID, efi56@bk.ru

Claimed Contributorship:
AA Makaricheva: formulation of the main concept, analysis of statistical data, preparation of the manuscript and figures, formulation of the conclusions
VM Efimova: academic advising, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 28.02.2024
Revised 19.03.2024
Accepted 26.03.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

Check for updates

УДК 581.9
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-17-25

Научная статья

EDN: SNXQGS

Оценка аллергенного потенциала древесной урбанофлоры города Ростова-на-Дону

М.М. Середа
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ seredam@yandex.ru

Аннотация

Введение. Пыльца растений вызывает у человека разнообразные аллергические реакции, в том числе респираторные заболевания, нарушения иммунной системы, бронхит, конъюнктивит, дерматит, сенную лихорадку. Ими страдает до 30 % населения мира. В крупных городах мощными источниками аллергенной пыльцы являются деревья и кустарники, используемые в зеленом строительстве. Тем не менее, озеленение большинства городов в мире проводится без учета аллергенности применяемых культур. С развитием протеомики появилась возможность детально оценить степень аллергенности различных белков, входящих в состав пыльцы. На этих сведениях сформированы шкалы потенциальной аллергенности древесных растений. Целью данного исследования явилась оценка аллергенного потенциала древесных растений урбанофлоры города Ростова-на-Дону.

Материалы и методы. Объектом исследования послужили деревья и кустарники, используемые в озеленении донской столицы. Анализ флористических данных основан на материалах, полученных в ходе полевых работ в 2023 году на территории города. Также автором использовались списки дедрофлоры города, составленные в период с 2007 по 2022 год. Оценка потенциальной аллергенности видов древесных растений проводилась по пятибалльной шкале, где 0 — растения, не представляющие аллергенной опасности; 1 — низкий класс аллергенности; 2 — средний класс; 3 — высокий класс; 4 — очень высокий класс аллергенности.

Результаты исследования. В составе флоры древесных растений Ростова-на-Дону выявлен 61 вид растений, представляющих разные уровни аллергенной опасности для здоровья человека. Доля исследуемых видов составляет 30 % от общего числа древесной урбанофлоры города. Самыми мощными источниками аллергенной пыльцы являются девять видов (*Fraxinus Excelsior*, *Betula Pendula, B. Verrucosa*, *Platycladus Orientalis* и др.), они представляют наибольшую угрозу возникновения поллинозов и других аллергических реакций. Как правило, это ветроопыляемые растения, продуцирующие максимальное количество пыльцы. Среди потенциально аллергенных видов отмечается значительное количество адвентивных видов (24 вида), что затрудняет контроль над их распространением. Проведен таксономический анализ потенциально аллергенных видов растений на уровне порядков, для которых выявлены специфические реакции белков и разработаны детальные подходы к профилактике и лечению поллинозов. Порядки Pinales и Fagales формируют основную массу аллергенной пыльцы в зимне-весенний период.

Обсуждение и заключение. Исследования аллергенной активности древесной урбанофлоры на юге России проведены впервые. Оценка ее аллергенного потенциала позволила определить степень угрозы возникновения аллергических реакций у людей. Наибольшую опасность представляют одновременно аллергенные и инвазионные виды, способные к активному распространению и увеличению своей численности. Мощными источниками аллергенной пыльцы оказались представители порядков Pinales и Fagales. Они же, как правило, обладают высокими декоративными качествами и играют ведущую роль в дизайнерских проектах. В ряде случаев эти культуры можно замещать менее аллергенными, например, представителями порядка Rosales.

Ключевые слова: пыльца древесных растений, аллергия на пыльцу растений, урбанофлора, флора города Ростова-на-Дону, адвентивные виды

Благодарности. Автор благодарит редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению содержания статьи.

Для цитирования. Середа М.М. Оценка аллергенного потенциала древесной урбанофлоры города Ростова-на-Дону. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):17–25. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-17-25

Research Article

Assessment of the Allergenic Potential of Urban Woody Flora of Rostov-on-Don

Mikhail M. Sereda
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ seredam@yandex.ru

Abstract

Introduction. Plant pollen causes various allergic reactions in humans, including respiratory diseases, immune system disorders, bronchitis, conjunctivitis, dermatitis, and hay fever. These diseases affect up to 30% of the world's population. In large cities, trees and shrubs used in landscaping are significant sources of allergenic dust. Despite this, the greening of cities worldwide often occurs without considering the allergenic properties of plants. With the development of proteomics, it has become possible to assess the degree of allergenicity of proteins that make up plant pollen in detail. Based on this information, a scale of potential allergenicity for woody plants has been developed. The aim of this study is to assess the allergenic potential of woody plants in the urban flora of Rostov-on-Don.

Materials and Methods. The object of the study was trees and shrubs used in the landscaping of Rostov-on-Don. The analysis of floristic data was based on the materials obtained during field work in 2023 on the territory of Rostov-on-Don. The author also used the lists of the city's dendroflora compiled between 2007 and 2022. The assessment of the potential allergenicity of woody plant species was conducted on a five-point scale, with 0 indicating plants that did not pose an allergic hazard, 1 indicating a low allergenicity level, 2 indicating a medium class, 3 indicating a high level, and 4 indicating a very high level of allergenicity.

Results. In the flora of woody plants in Rostov-on-Don, 61 species of potentially allergenic plants were identified, posing varying levels of danger to human health. The share of all types of potentially allergenic woody plants was 30% of the total number of urban woody flora species in the city. The most powerful sources of allergenic pollen included nine species (*Fraxinus Excelsior, Betula Pendula, B. Verrucosa, Platycladus Orientalis,* etc.), which posed the greatest threat of hay fever and other allergic reactions. As a rule, these were typically wind-pollinated plants that produced maximum amounts of pollen. The list of potentially allergenic species included a significant number of adventitious species (24 species), which made it difficult to control their spread. A taxonomic analysis of potentially allergenic species was carried out at the order level, for which specific protein reactions were identified and detailed approaches to the prevention and treatment of hay fever were developed. The orders Pinales and Fagales form the bulk of allergenic pollen in the winter-spring period.

Discussion and Conclusion. For the first time, studies were conducted on the allergenic activity of urban woody flora in the southern regions of Russia. An assessment of their allergenic potential allowed us to determine the level of threat of allergic reactions in humans. The greatest danger comes from both allergenic and invasive species that can spread actively and increase in numbers. Representatives of the Pinales and Fagales orders have proven to be significant sources of allergenic pollen, as they often have high ornamental qualities and play a prominent role in design projects. In some cases, it may be possible to replace these cultures with less allergenic alternatives, such as representatives of the Rosales order, to reduce the risk of allergic reactions.

Keywords: pollen of woody plants, allergies to pollen, urban flora, flora of Rostov-on-Don, adventive species

Acknowledgements. The author would like to thank the Editorial board of the journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations that improved the quality of the article.

For Citation. Sereda MM. Assessment of the Allergenic Potential of Urban Woody Flora of Rostov-on-Don. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):17–25. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-17-25

Введение. Респираторные заболевания, связанные с атмосферной пыльцой растений, в настоящее время представляют собой глобальную проблему для общественного здравоохранения, поскольку ими страдает около 30 % населения мира [1]. В России аллергическим ринитом, как самым распространенным аллергическим заболеванием, страдает от 11 до 24 % населения в зависимости от региона [2, 3]. Аллергические реакции могут затрагивать иммунную систему человека, нарушать ее работу [4]. Также пыльцевая аллергия способна

вызывать ряд других заболеваний (бронхит, конъюнктивит, дерматит, сенная лихорадка), а длительное воздействие ее высоких концентраций может привести к хроническому бронхиту и бронхиальной астме [5].

Довольно часто пыльцевую аллергию связывают только с цветением амброзии (*Ambrosia sp.*) и некоторых видов злаковых растений (овес, пшеница, кукуруза), однако источников аллергенной пыльцы гораздо больше. К этому списку необходимо добавить культивируемые растения (сахарная свекла, клевер, щавель, подсолнечник), сорняки (одуванчик, подорожник, крапива, полынь, лебеда) и различные виды древесных растений. Пыльца с содержанием простых алкалоидов, аминов, сапонинов, эфирных масел чаще всего вызывает различные поллинозы [6]. Среди ученых существуют разногласия относительно аллергенности пыльцы хвойных растений, таких как кипарисовые, тисовые и сосновые. Одни авторы [7] придерживаются мнения о том, что пыльца хвойных растений обладает наименее выраженными аллергенными свойствами, другие специалисты [8] отмечают у хвойных пород очень высокую аллергенную активность. Очевидно, что ландшафт и характер растительности будут играть решающую роль в наборе аллергенных факторов. Несомненно то, что в условиях крупных городов аллергенная обстановка будет формироваться в основном за счет древесных растений.

Исследования городской растительности как источника аллергенов пока немногочисленны [9, 10]. В некоторых странах мира действуют аэробиологические станции, на которых собирают данные о содержании аллергенов в атмосфере. Это позволяет системно подходить к изучению проблемы выявления аллергенных видов и определению уровня их опасности.

Одной из первых инициатив в области определения аллергенности видов садовых растений является исследование T. Ogren [11], который разработал шкалу аллергенности растений (OPALs) — систему для измерения способности растения вызывать аллергические реакции у людей. K. Hruska [12] установила фитоаллергенный потенциал различных видов растений, присутствующих в городских экосистемах Италии, на основе их биологических и фенологических характеристик. Более поздними являются проекты [8, 13] со списками характеристик и признаков аллергенности 100 наиболее используемых видов городского озеленения, они составлялись с целью выявления проблем аллергенности у населения. На основе вышеупомянутых работ, а также с привлечением молекулярных исследований белковых соединений в составе пыльцы [14] был разработан список из 150 часто встречающихся деревьев и кустарников средиземноморских городов с оценкой их потенциальной аллергенности по шкале от 0 до 4 (VPA).

С развитием молекулярной биологии, в частности протеомики, удалось приблизиться к молекулярным механизмам возникновения аллергических реакций человека на пыльцевые частицы [15]. Установлено, что наиболее мощными источниками аллергенов являются представители порядков Fagales, Lamiales, Proteales и Pinales. Цель представленного сегодня исследования — дать характеристику аллергенности древесных растений, составляющих урбанофлору Ростова-на-Дону.

Материалы и методы. Объектом исследования послужили деревья и кустарники, находящиеся в устойчивой и преемственной культуре городского озеленения. Анализ флористических данных основан на материалах, полученных в ходе полевых работ в 2023 году на территории города. Также в ходе оценки урбанофлоры были использованы работы Огородниковой Т.К., Похилько Л.О., Федориновой О.И [16], Козловского Б.Л., Куропятникова М.В. [17], Березина В.В. [18]. Инвазионность видов растений определялась в соответствии с данными, собранными Виноградовой Ю.К., Майоровым С.Р., Хорун Л.В. [19]. Оценка потенциальной аллергенности видов древесных растений проводилась по шкале [14], где 0 — растения не представляют аллергенной опасности; 1 — низкий класс аллергенности; 2 — средний класс; 3 — высокий класс; 4 — очень высокий класс аллергенности.

Ростов-на-Дону находится в зоне умеренно континентального климата с мягкой зимой и жарким, сухим летом. Средняя температура воздуха, по данным многолетних наблюдений, составляет +11,0 °C. Самый холодный месяц — январь (со средней температурой –2,0 °C), самый теплый месяц — июль (со средней температурой +23,4 °C). Среднегодовая сумма осадков в Ростове-на-Дону составляет 618 мм. Зональным типом растительности, окружающей городской ландшафт, являются степи [20].

Результаты исследования. В составе флоры древесных растений Ростова-на-Дону выявлен 61 вид потенциально аллергенных растений, представляющих разные уровни опасности для здоровья человека. По данным [17], так называемый реальный ассортимент древесных растений города насчитывает 200 видов голосеменных и покрытосеменных растений, относящихся к 97 родам из 43 семейств. Учитывались виды, находящиеся в устойчивой и преемственной культуре городского озеленения. Таким образом, доля всех видов потенциально аллергенных древесных растений (VPA-виды) составляет 30 % от всей древесной урбанофлоры (таблица 1).

Таблица 1

Потенциально аллергенные виды древесных растений в урбанофлоре города Ростова-на-Дону

Род (вид)	Кол-во видов в роде	Адвентивные	Инвазионные	VPA	Порядок
Acer (кроме *A. Negundo*)	4	2		2	Sapindales
Acer Negundo		Северная Америка	Transformers	2+	Sapindales
Aesculus Hippocastanum		Центральная Европа		1	Sapindales
Ailanthus Altissima		Азия	Transformers	3	Sapindales
Betula	2			4	Fagales
Campsis Radicans		Северная Америка		1	Lamiales
Catalpa Bignonioides		Северная Америка		1	Lamiales
Cercis Siliquastrum		Азия		1	Fabales
Corylus Avellana				4	Fagales
Cotoneaster	3			1	Rosales
Crataegus (кроме *C. Monogyna*)	4			1	Rosales
Crataegus Monogyna			Invasive plants		Rosales
Elaeagnus Angustifolia			Naturalized plants	1	Rosales
Fraxinus Excelsior				4	Lamiales
Ginkgo Biloba		Китай		3	*Ginkgoales*
Gleditsia Triacanthos		Северная Америка		1	Fabales
Hibiscus Syriacus		Азия		1	Malvales
Juglans Nigra		Северная Америка		3	Fagales
Juniperus	2	1		4	Pinales
Ligustrum Vulgare				2	Pinales
Malus Domestica				1	Rosales
Morus Alba		Азия		3	Rosales
Morus Nigra		Азия		4	Rosales
Paulownia Tomentosa		Китай		1	Lamiales
Picea Pungens		Северная Америка		1	Pinales
Pinus Sylvestris				2	Pinales
Platanus x Acerifolia		Азия		3	Proteales
Platycladus Orientalis		Китай		4	Pinales
Populus Alba			Transformers	3	Malpighiales
Populus Deltoides				1	Malpighiales
Prunus	2			1	Rosales
Pseudotsuga Menziesii		Северная Америка		1	Pinales
Pyrus Comminis				1	Rosales
Quercus Robur				2	Fagales
Rhus Typhina		Африка		1	Sapindales
Robinia Pseudoacacia		Северная Америка		1	Fabales
Rosa Canina				1	Rosales
Salix Alba				3	Malpighiales
Sambucus Nigra				1	Dipsacales
Sophora Japonica		Азия		1	Fabales
Sorbus Aucuparia				1	Rosales
Spiraea x Vanhouttei				1	Rosales
Tamarix Tetrandra				2	Caryophyllales
Thuja Occidentalis		Северная Америка		4	Pinales
Tilia Cordata				2	Malvales
Ulmus	3			3	Rosales
Viburnum Lantana				1	Dipsacales

Необходимо отметить, что перечень VPA-видов довольно неоднороден по значению аллергенности (рис. 1).

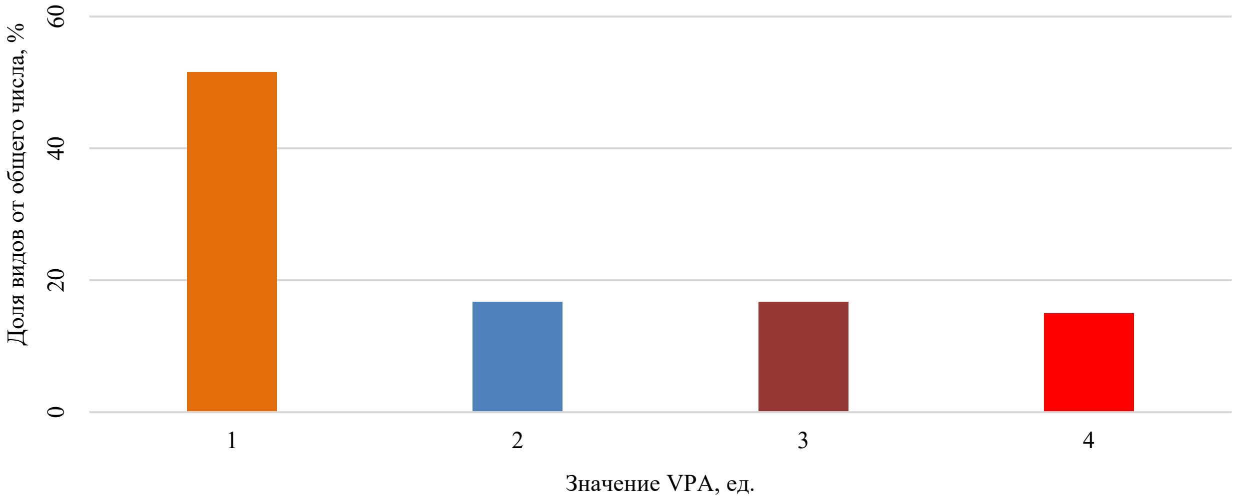


Рис. 1. Распределение VPA-видов древесной урбанофлоры Ростова-на-Дону по уровням аллергенности

Наиболее многочисленной оказалась группа № 1, в ней 31 вид, что составляет 51,6 % от общего числа VPA-видов. Они несут минимальную угрозу возникновения аллергических реакций. Тем не менее, в эту группу входят достаточно распространенные в городе породы, такие как каштан конский (*Aesculus Hippocastanum*), катальпа бигнониевидная (*Catalpa Bignonioides*), гледичия трехколючковая (*Gleditsia Triacanthos*), робиния ложноакациевая (*Robinia Pseudoacacia*) и др. Данные виды являются энтомофильными и продуцируют значительно меньше пыльцы, чем ветроопыляемые растения. У некоторых видов этой группы аллергенную активность проявляет только пыльца, другие части растения могут обладать обратным эффектом. По данным авторов [21], экстракты плодов гледичии трехколючковой проявляют ярко выраженные противоаллергенные свойства.

Ко второму классу аллергенности было отнесено 10 видов (16,7 %). В частности, это клен (*Acer)*, липа (*Tilia Cordata*), сосна обыкновенная (*Pinus Sylvestris*) и др. По характеру опыления — это смешанные виды, т.е. для переноса пыльцы используются насекомые, но для их привлечения небольшие порции пыльцы попадают в воздух анемофильным способом [14].

К третьей категории относится также 10 видов (16,7 %), которые отличаются высокой степенью аллергенности. Среди них вяз (*Ulmus*), шелковица (*Morus Alba*), тополь белый (*Populus Alba*), айлант (*Ailanthus Altissima*) и др. При определении аллергенности айланта специалистам не удалось прийти к единому мнению, поскольку до сих пор не выяснена стратегия его опыления, а именно опыляется ли он амфифильно или анемофильно. В последнем случае есть все основания отнести его в третью категорию VPA-видов.

К четвертой категории принадлежат 9 видов (15 %), представляющих наибольшую потенциальную угрозу возникновения поллинозов и других аллергических реакций. Среди них хорошо известны и распространены ясень высочайший (*Fraxinus Excelsior*), береза (*Betula Pendula, B. Verrucosa*), плосковеточник (*Platycladus Orientalis*), т.е. типично ветроопыляемые растения, следовательно, продуцирующие максимальные количества пыльцы.

Анализ выявленных потенциально аллергенных видов показывает довольно высокий процент адвентивных (чужеродных для местных сообществ) видов. Очевидно, что пыльца таких растений вызывает более острые и менее предсказуемые реакции организма человека, и происходит это как минимум по двум причинам. Во-первых, это отсутствие иммунных механизмов борьбы с новыми белками в пыльце чужеродных растений [15], во-вторых, некоторые адвентивные виды агрессивно захватывают новые места обитания, что ведет к резкому повышению их численности и, следовательно, к увеличению пыльцевой массы в атмосфере. Таким образом, доля адвентивных видов в списке VPA-видов может нести дополнительную информацию о потенциальной аллергенной опасности урбанофлоры (таблица 1). В урбанофлоре Ростова-на-Дону обнаружено 24 адвентивных потенциально аллергенных видов, что составляет 12 % от их общего числа. Почти половина из этих видов (45,8 %) — выходцы из Северной Америки, остальные имеют азиатское или африканское происхождение. Кроме того, в число аллергенных входит пять инвазионных видов с разными инвазионными статусами. Эти виды могут внедряться в естественные ценозы и преобразовывать природные экосистемы. Необходимо контролировать распространение указанных культур путем мониторинговых исследований урбанофлоры.

Таксономический анализ VPA-видов показал распределение потенциально аллергенных видов в порядках, для которых выявлены специфические реакции белков и разработаны детальные подходы к профилактике и лечению поллинозов (рис. 2).

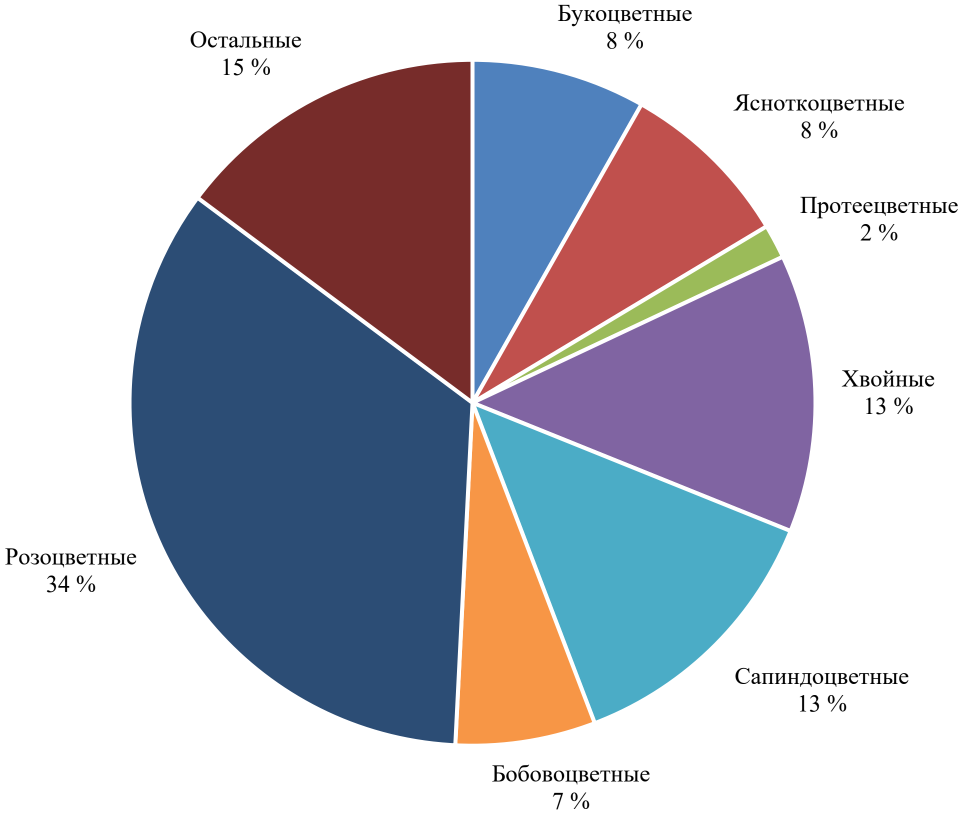


Рис. 2. Распределение VPA-видов древесной урбанофлоры Ростова-на-Дону в таксонах на уровне порядков

В спектре порядков лидируют Pinales (13,1 %) и Sapindales (13,1 %). В порядок Pinales входят широко распространенные в зеленом строительстве можжевельники (*Juniperus Virginiana*, *J. Sabina*), которые по VPA-шкале относятся к классу с очень высоким содержанием аллергенов. По данным [22], в пыльце можжевельников обнаружены аллергены Cry j 1 и Cup a 1, которые принадлежат к семейству белков пектатлиазы и демонстрируют высокие уровни перекрестной реактивности. Аллергены пектатлиазы идентифицированы как мажорные аллергены не только в пыльце деревьев Cupressaceae, но и в сорняках Asteraceae, что сближает их с этой точки зрения с амброзией.

Второе место по числу видов разделяют порядки Lamiales (8,2 %) и Fagales (8,2 %). Пыльца деревьев Fagales является основной причиной зимне-весеннего поллиноза в умеренной климатической зоне Северного полушария [23]. Порядок включает в себя семейства Betulaceae, Juglandaceae, Fagaceae, которые чаще всего и вызывают аллергию. Недавнее исследование выявило сходство белков в пыльце березы с белками семейства липокалина, к которым принадлежит большинство аллергенов животного происхождения.

В порядке Lamiales только семейство Oleaceae включает в себя виды с аллергенной активностью. Так, ясень высокий (*Fraxinus Excelsior*) — довольно мощный источник аллергенов. Пыльцевая продуктивность его может достигать такого же уровня, как и у березы, при этом сезоны цветения обоих деревьев значительно перекрываются. Сирень (*Syringa Vulgaris*) и бирючина обыкновенная (*Ligustrum Vulgare*) — два представителя семейства Oleaceae, которые вызывают аллергию и астму. Оба растения широко внедрены в культуру зеленых насаждений Ростова-на-Дону. Интересно, что бирючина — это дерево, опыляемое насекомыми, таким образом, концентрации ее пыльцы в окружающей среде обычно очень низкие, тем не менее есть свидетельства того, что бирючина может действовать как сенсибилизатор при аллергии на все Lamiales [24].

Порядок Proteales включает в себя всего один вид — платан кленолистный (*Platanus x Acerifolia*). Платан является распространенной культурой в южных городах, в том числе и в Ростове-на-Дону. Порода обладает высокой пыльцевой продуктивностью. Например, в Испании в сезон цветения высвобождаемая пыльца может достигать уровня в 14 % от общего количества пыльцы [25, 26].

Порядок Rosales включает в себя 21 вид (34,4 %) древесных потенциально аллергенных растений из семейств Rosaceae, Moraceae, Ulmaceae и др. В этом ряду наиболее мощными источниками аллергенов являются представители Moraceae и Ulmaceae, причем это растения либо со смешанным типом опыления, такие как тутовые, или исключительно анемофильные — вязовые.

В остальных порядках, доля которых составляет 14,8 %, внимание заслуживают только Malpighiales, к которым относятся тополь (*Populus*) и ива (*Salix*). Эти культуры обладают умеренной аллергенной активностью.

Обсуждение и заключение. Проведенная оценка аллергенного потенциала древесных растений урбанофлоры Ростова-на-Дону позволила установить степень угрозы возникновения аллергических явлений у горожан. Определение уровня аллергенной активности каждого вида древесной урбанофлоры открывает новые возможности для дальнейшего проектирования объектов озеленения, оказывающих минимальную нагрузку на органы дыхания и иммунную систему человека. Наибольшую опасность представляют одновременно аллергенные и инвазионные виды, способные к активному распространению и увеличению своей численности. Использование таких видов в ландшафтном дизайне города, а также внедрение новых подобных культур в ассортимент озеленения должны находиться под контролем дендрологов. Наиболее мощными источниками аллергенной пыльцы оказались представители порядков Pinales и Fagales. Они же, как правило, обладают высокими декоративными качествами и играют ведущую роль в дизайнерских проектах. В ряде случаев эти культуры можно заменять менее аллергенными, например, представителями порядка Rosales.

В перспективе необходимо разработать четкие рекомендации для озеленителей города по ограничению распространения аллергенных древесных культур.

Исследование аллергенной активности древесной урбанофлоры для городов юга России проводились впервые. Дальнейшие исследования будут связаны с древесными урбанофлорами городов сопредельных регионов с целью проведения сравнительного анализа.

Список литературы / References

1. Leth-Møller KB, Skaaby T, Linneberg A. Allergic Rhinitis and Allergic Sensitisation are Still Increasing among Danish Adults. *Allergy*. 2020;75(3):660–668. https://doi.org/10.1111/all.14046

2. Нуртдинова Г.М., Галимова Е.С., Хамидуллина С.Г., Муслимова В.К., Гареева А.И., Галимов Д.О. Аллергический ринит, вызванный пыльцой растений, у подростков. *Аллергология и иммунология в педиатрии*. 2022;71(4):22–27. https://doi.org/10.53529/2500-1175-2022-4-22-27

Nurtdinova GM, Galimova ES, Khamidullina SG, Muslimova VK, Gareeva AI, Galimov DO. Allergic Rhinitis Caused by Plant Pollen in Adolescents. *Allergology and Immunology in Pediatrics.* 2022;71(4):22–27. https://doi.org/10.53529/2500-1175-2022-4-22-27 (In Russ.).

3. Мачарадзе Д.Ш. Некоторые особенности распространенности респираторной аллергии на юге России. *Российский аллергологический журнал*. 2019;16(1):23–28. URL: https://rusalljournal.ru/raj/article/viewFile/17/7 (дата обращения: 25.02.2024).

Macharadze DSh. Some Features of the Prevalence of Respiratory Allergy in Southern Russia. *Russian Journal of Allergy*. 2019;16(1):23–28. https://rusalljournal.ru/raj/article/viewFile/17/7 (accessed: 25.02.2024). (In Russ.).

4. Nestorovic M, Jovanovic M, Sovljanski G, Bajic-Bibic L, Jokic J. *Guidebook for Allergenic Plants*. Belgrade: Museum of Natural History; 2011. pp. 22–42.

5. Cariñanos P, Casares-Porcel M, Quesada-Rubio J-M. Estimating the Allergenic Potential of Urban Green Spaces: a Case-Study in Granada, Spain. *Landscape and Urban Planning*. 2014;123:134–144. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.009

6. Морозова С.В. Весенняя аллергия в аспекте практической оториноларингологии. *Русский медицинский журнал*. 2015;23(6):322–325.

Morozova SV. Spring Allergy in the Aspect of Practical Otorhinolaryngology. *Russian Medical Journal*. 2015;23(6):322–325. (In Russ.).

7. Хаитов Р.М. (ред.), Ильина Н.И. (ред). *Аллергология и иммунология: национальное руководство*. Москва: ГЭОТАР-Медиа; 2009. 656 с.

Khaitov RM, Il'ina NI (eds.). *Allergology and Immunology: National Guidelines*. Moscow: GEOTAR-Media; 2009. 656 p. (In Russ.).

8. Cariñanos P, Adinolfi C., Diaz de la Guardia C, De Linares C, Casares-Porcel M, Characterization of Allergen Emission Sources in Urban Areas. *Journal of Environmental Quality*. 2016;45(1):244–252. https://doi.org/10.2134/jeq2015.02.0075

9. Mrđan S, Ljubojević M, Orlović S, Čukanović J, Dulić J. Poisonous and Allergenic Plant Species in Preschool's and Primary School's Yards in the City of Novi Sad. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017;25:112–119. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.05.007

10. Buters JTM, Antunes C, Galveias A, Bergmann C, Thibaudon M, Galan C, et al. Pollen and Spore Monitoring in the World. *Clinical and Translational Allergy*. 2018;8(9):1–5. https://doi.org/10.1186/s13601-018-0197-8

11. Ogren TL. *Allergy-Free Gardening. The Revolutionary Guide to Healthy Landscaping*. Berkeley, CA: Ten Speed Press; 2000. 267 p. https://doi.org/10.5070/G311310411

12. Hruska K. Assessment of Urban Allegophytes Using an Allergen Index. *Aerobiologia.* 2003;19(2):107–111. http://doi.org/10.1023/A:1024450601697

13. Ortolani C. Allergenicità Delle Piante Arboree e Arbustive Destinate al Verde Urbano Italiano. Revisione Sistematica e Raccomandazioni basate sull'evidenza. *European Journal Aerobiology and Environmental Medicine.* 2015;1:4–123.

14. Cariñanos P, Marinangeli F. An Updated Proposal of the Potential Allergenicity of 150 Ornamental Trees and Shrubs in Mediterranean Cities. *Urban Forestry & Urban Greening.* 2021;63:127218. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127218

15. Asam C, Hofer H, Wolf M, Aglas L, Wallner M. Tree Pollen Allergens – an Update from a Molecular Perspective. *Allergy*. 2015;70:1201–1211. https://doi.org/10.1111/all.12696

16. Огородникова Т.К., Похилько Л.О., Федоринова О.И. Принципы формирования ассортимента древесных растений для озеленения г. Ростова-на-Дону. В: *Труды IV научно-практической конференции с международным участием «Экологические проблемы. Взгляд в будущее», посвященной 70-летию со дня рождения профессора Ю.П. Хрусталева.* Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет; 2007. С. 257–260.

Ogorodnikova TK, Pokhil'ko LO, Fedorinova OI. Principles of Selecting a Variety of Woody Plants for Landscape Design in Rostov-on-Don. In: *Proceedings of the IV scientific and practical conference with international participation "Environmental problems. A look into the future" dedicated to the 70th anniversary of the birth of Professor Y.P. Khrustalev.* Rostov-on-Don: Southern Federal University; 2007. P. 257–260. (In Russ.).

17. Козловский Б.Л., Куропятников М.В., Федоринова О.И. Эколого-биологическая характеристика древесных растений урбанофлоры Ростова-на-Дону. *Известия Иркутского государственного университета*. 2011;4(2):38–43.

Kozlovsky BL, Kuropyatnikov MV, Fedorinova OI. Ecological and Biological Characteristics of Wood Plants in Urban Flora of Rostov-on-Don. *The Bulletin of Irkutsk State University*. 2011;4(2):38–43. (In Russ.).

18. Березина В.В., Козловский Б.Л., Куропятников М.В. Особенности ассортимента и архитектурно-планировочной композиции скверов Ростова-на-Дону. *Живые и биокосные системы*. 2022;42. https://doi.org/10.18522/2308-9709-2022-42-1

Berezina VV, Kozlovskij BL, Kuropyatnikov MV. Features of the Assortment and Architectural and Planning Composition of Public Gardens in Rostov-on-Don. *Live and Bio-Abiotic Systems*. 2022;42. https://doi.org/10.18522/2308-9709-2022-42-1 (In Russ.).

19. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. *Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России*. Москва: ГЕОС; 2010. 512 с.

Vinogradova YuK, Maiorov SR, Khorun LV. *The Black Book of the Flora of Central Russia: Alien Plant Species in the Ecosystems of Central Russia*. Moscow: GEOS; 2010. 512 p. (In Russ.).

20. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. *Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра*. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом; 2006. 488 с.

Panov VD, Lur'e PM, Larionov YuA. *Climate of the Rostov Region: Yesterday, Today, Tomorrow.* Rostov-on-Don: Donskoy Publishing House; 2006. 488 p. (In Russ.).

21. Jian-Ping Zhang, Xin-Hui Tian, Yong-Xun Yang, Qing-Xin Liu, Qun Wang, Li-Ping Chen, et al. Gleditsia Species: An Ethnomedical, Phytochemical and Pharmacological Review. *Journal of Ethnopharmacology*. 2016;178:155–171. https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.11.044

22. Hiroyuki Namba, Katsuyoshi Saitou, Norio Sahashi, Masahiko Yamamoto, Tomoe Yoshida, Hiroshi Ogasawara, et al. Relationship Between Pollen Counts of Cryptomeria Japonica and Cupressaceae and the Severity of Allergic Symptoms. *Allergology International*. 2001;50(2):133–142. https://doi.org/10.1046/j.1440-1592.2001.00216.x

23. D'Amato G, Spieksma FThM, Liccardi G, Jäger S, Russo M, Kontou-Fili K, et al. Pollen-Related Allergy in Europe. *Allergy.* 1998;53(6):567–578. http://dx.doi.org/10.1111/j.1398-9995.1998.tb03932.x

24. Roth-Walter F, Gomez-Casado C, Pacios L, Mothes-Luksch N, Roth GA, Singer J, et al. Bet v 1 from Birch Pollen Is a Lipocalin-Like Protein Acting as Allergen Only When Devoid of Iron by Promoting Th2 Lymphocytes. *Journal of Biological Chemistry.* 2014;289(25):17416–17421. https://doi.org/10.1074/jbc.m114.567875

25. Asero R. Analysis of Hypersensitivity to Oleaceae Pollen in an Olive-Free and Ash-Free Area by Commercial Pollen Extracts and Recombinant Allergens. *European Annals of Allergy and Clinical Immunology.* 2011;43(3):77–80.

26. Asturias JA, Ibarrola I, Bartolomé B, Ojeda I, Malet A, Martínez A. Purification and Characterization of Pla a 1, a Major Allergen from Platanus Acerifolia Pollen. *Allergy*. 2002;57(3):221–227. https://doi.org/10.1034/j.1398-9995.2002.03406.x

Об авторе:

Михаил Михайлович Середа, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой ботаники и биоресурсов факультета биоинженерии и ветеринарной медицины Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 5124-0983, ORCID, ScopusID, seredam@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 07.03.2024
Поступила после рецензирования 25.03.2024
Принята к публикации 02.04.2024

About the Author:

Mikhail M. Sereda, Cand.Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of the Botany and Bioresources Department, Bioengineering and Veterinary Medicine Faculty, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 5124-0983, ORCID, ScopusID, seredam@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Received 07.03.2024
Revised 25.03.2024
Accepted 02.04.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 628.386
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36

Научная статья

Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила

EDN: TBZMOY

Р.Я. Исхакова✉, **А.И. Нургалиев**
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация
✉ imreginaiskh@gmail.com

Аннотация
Введение. В настоящее время существует проблема накопления многотоннажных отходов производства. Одним из таких отходов является избыточный активный ил — отход биологической очистки сточных вод, характеризующийся высокой влажностью. При депонировании избыточного активного ила на картах возникают проблемы, связанные с изменением газовоздушного фона, выделением неприятных запахов, а также загрязнением грунтовых вод и почв. Продолжительное нахождение осадка на иловых картах в бескислородных условиях приводит к его загниванию, ухудшению влагоотдающих свойств. По этой причине разработка новых подходов к утилизации многотоннажного отхода, образующегося при очистке сточных вод, является актуальной. Целью данного исследования стала разработка способа предварительного обезвреживания и термической переработки избыточного активного ила с применением отхода энергетики.

Материалы и методы. В работе использовали избыточный активный ил с влажностью 98,2 % (отход IV класса опасности). В качестве реагента для повышения влагоотдачи применяли шлам водоподготовки (отход V класса опасности). Для экспериментальных исследований по обезвоживанию использовали лабораторную центрифугу Elmi CM-6M.01, на которой проводили испытания при различных условиях (500, 1 000 и 1 500 об/сек в течение 1, 2, 3 минут) и определяли значение индекса центрифугирования как критерия влагоотдачи осадка. Топливные гранулы были разработаны методом окатывания с применением в качестве связующего технического лигносульфоната. Элементный анализ образцов с целью изучения возможности термической утилизации проводился с применением анализатора EA 3 000 Euro Vector.

Результаты исследования. Разработана комплексная технология очистки образующихся газовых выбросов от твердых частиц, образующихся при сжигании топливных гранул и выносимых из топки в виде золы-уноса с уходящими газами. При этом одновременно также удаляются оксиды серы, азота, полихлорированные дибензодиоксины и дибензофураны при условии полезного использования тепла дымовых газов за счет снижения их температуры с 900–1200 °С до 140 °С.

Обсуждение и заключение. Предлагаемый в статье подход к переработке и утилизации многотоннажных отходов позволяет снизить влажность избыточного активного ила и использовать отход в качестве вторичного энергетического ресурса. Такой способ является экологически безопасным и позволяет решить двойную технико-экологическую задачу — эффективную переработку отходов производств, снижение антропогенной нагрузки на почвы, воздух, подземные воды, а также получение дополнительной электрической и тепловой энергии путем термической утилизации. Результаты работы свидетельствуют о возможности комплексного использования комбинации отходов различных производств (осадков сточных вод, отходов водоподготовки и целлюлозно-бумажной промышленности) в качестве вторичных энергетических ресурсов. Полученные результаты представляют практический интерес для предприятий коммунального и промышленного сектора, на которых имеются сооружения очистки сточных вод.

Ключевые слова: отходы, избыточный активный ил, обезвреживание, термическая утилизация, топливные гранулы, экологически безопасная технология

Благодарности. Авторы выражают признательность руководству и коллегам ФГБОУ ВО «КГЭУ», а также благодарят анонимных рецензентов за помощь, оказанную в процессе подготовки статьи.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21–79–10406, https://rscf.ru/project/21-79-10406/

Для цитирования. Исхакова Р.Я., Нургалиев А.И. Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):26–36. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36

Research Article

Dehydration and Environmentally Friendly Thermal Processing of Excess Activated Sludge

Regina Ya. Iskhakova ✉, **Artur I. Nurgaliev**
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation
✉ imreginaiskh@gmail.com

Abstract

Introduction. Currently, there is a problem with the accumulation of large amounts of production waste. One type of this waste is excess activated sludge, which is a waste product from biological wastewater treatment that has a high moisture content. When excess activated sludge is deposited in beds, problems can arise related to changes in the gas-air environment, the release of unpleasant odors, as well as the contamination of groundwater and soil. Prolonged presence of sediment in sludge beds in oxygen-free conditions leads to its decay and deterioration of moisture-yielding properties. For these reasons, the development of new methods for disposing of large volumes of waste generated during wastewater treatment is essential. The aim of this research is to develop a technique for preliminary neutralization and thermal treatment of excess activated sludge using energy waste.

Materials and Methods. The work used excess activated sludge with a moisture content of 98.2% (waste of hazard class IV). Water treatment sludge (waste of hazard class V) was used as a reagent to increase moisture yield. For experimental studies on dehydration, a laboratory centrifuge Elmi CM-6M.01 was used. Tests were conducted under various conditions (500, 1 000, and 1 500 revolutions per second for 1, 2, and 3 minutes), and the value of centrifugation was determined as a criterion for moisture yield in the sludge. Fuel pellets were produced by rolling with technical lignosulfonate as a binding agent. Elemental analysis of the samples was conducted to study the possibility of thermal treatment using an EA 3 000 Euro Vector Analyzer.

Results. A comprehensive technology has been developed to clean the resulting gas emissions from solid particles formed during the combustion of fuel pellets and remove them from the furnace in the form of fly ash along with the outgoing gases. This technology also removed sulfur oxides, nitrogen oxides, and polychlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans, while beneficially utilizing flue gas heat by reducing its temperature from 900–1 200°C to 140°C.

Discussion and Conclusion. The approach proposed in this article for the processing and disposal of large volumes of waste allows for the reduction of moisture content of excess activated sludge and the use of this waste as a secondary energy source. This method is environmentally friendly and addresses both technical and environmental challenges, such as the effective recycling of industrial waste and reducing the anthropogenic impact on soil, air, and groundwater. It also provides an opportunity to generate additional electrical and thermal energy through thermal utilization of waste. The results of this work indicate that it is possible to integrate the use of various types of industrial waste (sewage sludge, water treatment waste, and pulp and paper industry waste) as secondary energy sources. These findings have practical implications for enterprises in both the municipal and industrial sectors with wastewater treatment facilities.

Keywords: waste, excess activated sludge, neutralization, thermal disposal, fuel pellets, environmentally safe technology

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the management and colleagues of Kazan State Power Engineering University. They would also like to thank the anonymous reviewers for their assistance during the preparation of this article.

Funding Information. The research was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21–79–10406, https://rscf.ru/en/project/21-79-10406/

For Citation. Iskhakova RYa, Nurgaliev AI. Dehydration and Environmentally Friendly Thermal Processing of Excess Activated Sludge. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):26–36. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36

Введение. Обеспечение экологической безопасности путем снижения экологической нагрузки на окружающую среду посредством разработки и реализации комплексных подходов обращения с отходами является одной из ключевых целей в сфере устойчивого развития. При этом в настоящее время высокий процент отходов подвергается захоронению, так как отсутствуют высокоэффективные производства по переработке и утилизации отходов. В связи с интенсивным ростом объемов различных категорий отходов каждый год возрастает экологическая нагрузка на существующие полигоны и накопители. Все более острыми становятся проблемы загрязнения окружающей среды вследствие ненадлежащей эксплуатации полигонов, необходимости их территориального расширения. Значительная часть отходов, которая в настоящее время подвергается захоронению, может поступать на переработку и утилизацию, что позволит многократно сократить нагрузку на полигоны и получить готовый вторичный материальный ресурс, пригодный для дальнейшего вовлечения в производственный цикл.

Одним из таких отходов выступает избыточный активный ил — осадок, образующийся в процессе биологической очистки сточных вод, который отводится на иловые поля для сушки в естественных условиях. При этом в Российской Федерации образуется порядка 100 млн. тонн такого осадка ежегодно. Складирование избыточного активного ила приводит к изменению газовоздушного фона, распространению неприятных запахов и бактериальному загрязнению почв.

Еще одним многотоннажным отходом производства является шлам водоподготовки тепловых электрических станций (ТЭС), образующийся в осветлительных фильтрах при проведении известкования и коагуляции природной добавочной воды. Шлам отводится в виде пульпы на шламонакопители. При его складировании и хранении возникает проблема защелачивания почв, повышения минерализации подземных вод.

Общей проблемой, характерной для хранения многотоннажных отходов, является отчуждение сельскохозяйственных земель и территорий, а также увеличение антропогенной нагрузки на окружающую природную среду.

Для снижения антропогенной нагрузки используются различные способы утилизации отходов, в том числе избыточного активного ила [1]. Например, проводится переработка активного ила для получения адсорбционного материала для сорбции нефти и нефтепродуктов [2], а также для извлечения фосфатов и других загрязняющих вещества, присутствующих в городских сточных водах [3]. Еще одним способом утилизации активного ила является его использование в качестве добавки к органическим минеральным удобрениям [4], в строительстве при изготовлении бетонной смеси [5], а также в процессе анаэробного сбраживания для получения биогаза и использования твердой фазы (кека) как удобрения и рекультиванта [6]. Существуют работы зарубежных и современных авторов по использованию энергетического потенциала избыточного активного ила. Например, в [7] предлагается получение водорода из отработанного активного ила с применением микробной электролизной ячейки, в которой органические соединения могут быть использованы в качестве субстрата. Пиролиз активного ила является еще одним способом использования энергетического потенциала и получения дополнительной энергии при термическом разложении избыточного ила допиролизного газа, полукокса и жидкой фракции [8].

Целью данной работы явилось исследование и разработка способа предварительного обезвреживания и термической переработки избыточного активного ила с применением многотоннажного отхода энергетики.

Материалы и методы. Экспериментальные лабораторные исследования проводили с использованием избыточного активного ила — осадка биологической очистки сточных вод, видовой состав которого представлен простейшими, амебами, коловратками, инфузориями, нематодами, актиномицетами и прочими микроорганизмами.

Структура активного ила представляет собой хлопьевидную массу бурого цвета, являющуюся гетерогенной системой, относящуюся к тонким суспензиям. Был определен гранулометрический состав активного ила: частицы размером менее 1 мм составили 98 %, 1–3 мм — 1,5–1,8 %, более 3 мм — 0,4–0,6 %. Плотность используемого материала — 1,11 г/см^3. Основными органическими компонентами являются белки, жиры и углеводы, составляющие 75–85 % беззольного (органического) вещества. Остальные 15–20 % приходятся на долю лигниногумусового комплекса [9]. Компонентный состав избыточного активного ила представлен в таблице 1. В сырых осадках в основном присутствуют белковые вещества, в сброженных — гуминовые соединения [10].

Таблица 1

Компонентный состав избыточного ила

Параметр	Зольность	α-целлюлоза	Геми-целлюлоза	Белки, гуматы	Жиры	Общий азот	Фосфор
%	12–15	0,8–2,0	2,2–2,6	30–35	7,11–14,0	6,8–7,3	5,4

Влажность используемого активного ила после вторичных отстойников составляла 98,2 %, после отстаивания под действием силы тяжести снижалась до 94 %. Зольность активного ила —12,2 %. Избыточный активный ил относится к IV классу опасности.

Химический состав минеральной части избыточного активного ила включает в себя (масс. %): SiO_2 — 35,7; Al_2O_3 — 12,3; Fe_2O_3 — 7,8; CaO — 14,2; MgO — 9,4; K_2O — 0,8; Na_2O — 2,1; ZnO — 0,22; CuO — 0,12; NiO — 0,28; Cr_2O_3 — 0,23.

Избыточный активный ил относится к группе гигрофильных органических субстратов, легко загнивающих и по этой причине подлежащих обработке [11]. Органическая часть избыточного активного ила подвержена быстрому загниванию с выделением неприятного запаха, при этом увеличивается количество коллоидных и мелкодисперсных частиц, вследствие чего снижается водоотдача осадков [12].

Влага активного ила включает в себя свободную, коллоидно-связанную и гигроскопическую формы. Свободная влага не связана с твердыми частицами и легко удаляется сушкой на иловых площадках, фильтрацией или отжимом при небольших давлениях, обезвоживанием [13]. Коллоидно-связанная влага извлекается из осадков с бóльшими энергозатратами, может быть удалена фильтрацией и центрифугированием при коагуляции. Полное удаление коллоидно-связанной влаги возможно только путем сушки при повышенных температурах. Гигроскопическая (или химически связанная) влага составляет до 8–10 % от всей массы воды и не удаляется даже при термической сушке, а только путем сжигания осадка [14].

Помимо высокой влажности активный ил характеризуется низкой влагоотдачей, что связано с присутствием в нем коллоидно-связанной и гигроскопической влаги. Коллоидно-связанная влага присутствует в активном иле за счет процессов загнивания его органической части, так как загнивание характеризуется повышенным образованием мелкодисперсных, коллоидных частиц.

В исследовании предлагается извлекать коллоидно-связанную влагу за счет предварительной обработки избыточного активного ила шламом водоподготовки ТЭС и дальнейшего их совместного центрифугирования.

В качестве реагента предложено использовать шлам водоподготовки ТЭС, который является отходом V класса опасности, образующимся при подготовке добавочной воды на ТЭС. При этом шламовая пульпа направляется на шламонакопители для ее размещения и хранения. Химический состав карбонатного шлама Казанской ТЭЦ-1 (% масс.): Ca^{2+} — 87; Mg^{2+} — 9,7; CO_3^{2-} — 71,7; OH^- — 10,03; SO_4^{2-} — 5,7.

При проведении экспериментальных исследований влажность шламовой пульпы была снижена с 87 % до 3 % путем обезвоживания отхода в цехе термической осушки. В шламе присутствовали гуминовые вещества в количестве до 11 % общей массы образца, что было установлено методом газовой хромато-масс-спектрометрии [15]. Определены физико-химические характеристики шлама: насыпная плотность — 572 кг/м^3, зольность шлама — 89 %, влагоемкость — 56 % (масс.), pH среды — 8,54. Гранулометрический анализ, проведенный ситовым методом, показал, что основная фракция шлама (около 96 %) составляет 0,09–0,5 мм.

При дозировании шлам водоподготовки равномерно распределяли среди крупных волокон и твердых частиц, присутствующих в избыточном активном иле, и тщательно перемешивали осадки.

В экспериментальных исследованиях использовали лабораторную центрифугу Elmi CM-6M.01 с целью обезвоживания избыточного активного ила. Предварительно перемешанные в различных пропорциях отходы (активный ил и шлам) подвергались разделению в центрифуге при ее работе на скоростях 500, 1 000 и 1 500 об/сек в течение 1, 2, 3 минут.

Далее определяли индекс центрифугирования как критерий влагоотдачи осадка [16].

Оценку влагоотдачи и седиментационных свойств активного ила проводили по значению индекса центрифугирования *I* (см^3/ г), рассчитываемого по формуле:

$$I = \frac{V_k}{V_0 \cdot C},$$

где V_k и V_0 — объем уплотненного и исходного осадка, см^3; C — концентрация исходного осадка, г/см^3.

Индекс центрифугирования, как параметр в качестве критерия, позволяет провести оценку повышения эффективности задержания сухого вещества при предварительной обработке избыточного активного ила шламом водоподготовки. После обезвоживания осадок направляли на термическую утилизацию. Для удобства дозирования методом окатывания были разработаны топливные гранулы размером 5–7 мм. В качестве связующего были использованы технический порошкообразный лигносульфонат и технический кукурузный крахмал. Лигносульфонат представляет собой мучнистый порошок от светло-желтого до коричневого цвета, являющийся побочным продуктом при варке целлюлозной массы. Технический кукурузный крахмал является однородным порошкообразным материалом от белого до светло-жёлтого цвета и выступает одним из наиболее многофункциональных сырьевых продуктов.

Выбор связующих был обусловлен их доступностью, невысокой стоимостью, низкой влажностью (не более 8 % и 10 % соответственно) и высокой теплотой сгорания (низшая теплота сгорания — 17,2 и 16,8 МДж/кг соответственно) [17]. Выбранные связующие являются взрыво- и пожаробезопасными.

Далее определяли общетехнические характеристики полученных гранул: влажность, зольность, прочность на истирание, насыпную плотность, а также теплоту сгорания гранул. Элементный анализ образцов проводили с применением анализатора EA 3000 Euro Vector. На основании проведенных исследований проводили выбор подходящей схемы очистки газовых выбросов.

Для получения достоверных данных все экспериментальные исследования проводились не менее трех раз.

Результаты исследования. Экспериментальные исследования показали, что активный ил характеризуется высокой влажностью — 98,2 %. Для эффективного обезвоживания проведено центрифугирование избыточного активного ила и шлама водоподготовки. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1.

По результатам исследования видно, что при увеличении дозируемого шлама происходит снижение индекса центрифугирования. Наиболее оптимальным является центрифугирование избыточного ила при предварительной обработке шламом в количестве 0,6 г/дм^3 в течение 1 мин со скоростью 1 000 об/с.

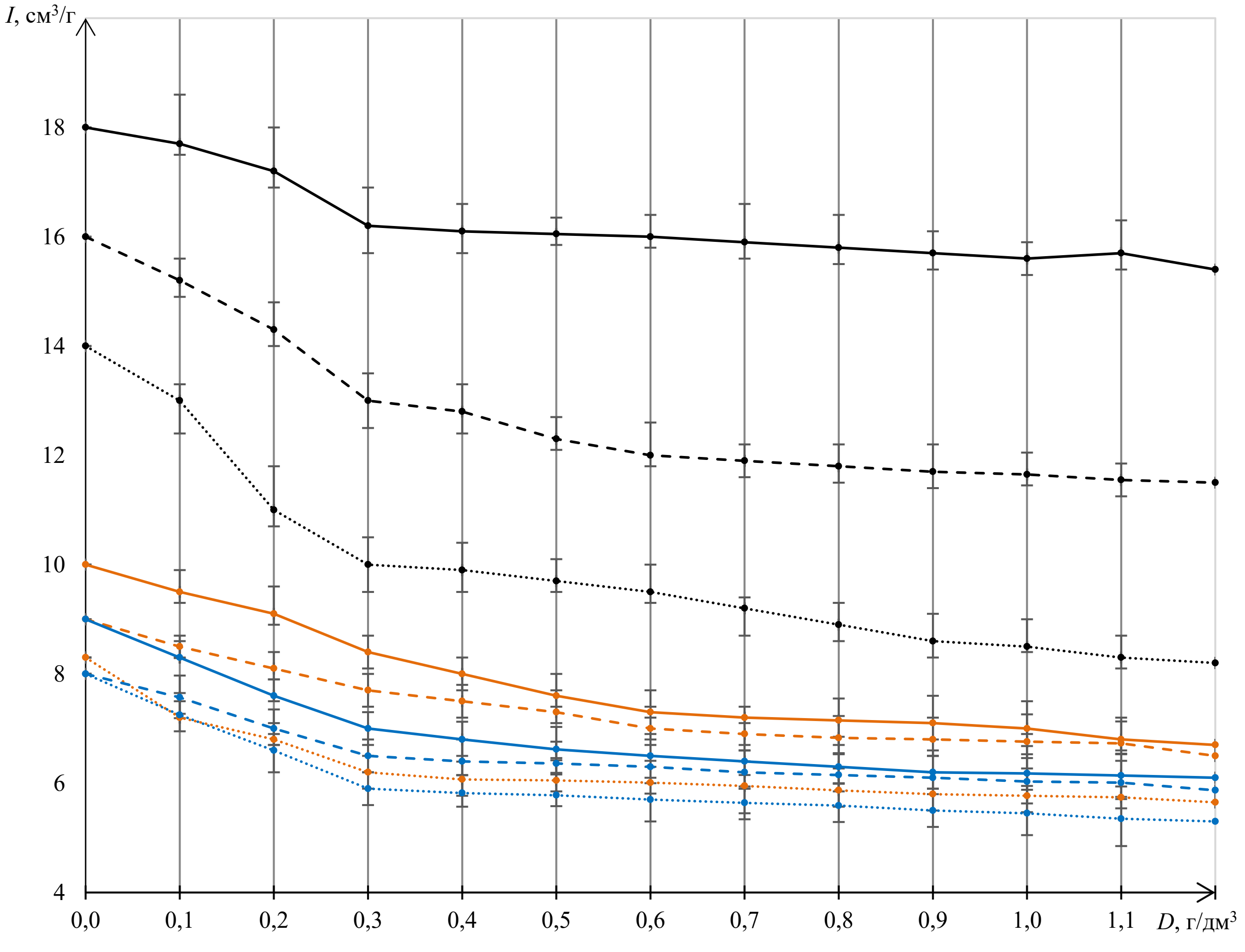


Рис. 1. Зависимость значения индекса центрифугирования (I) от вводимой дозы шлама (D):
(черная) — 500 об/мин; (оранжевая) — 1 000 об/мин; (синяя) — 1 500 об/мин;
— 1 мин; — 2 мин; — 3 мин

При центрифугировании твердые частицы шлама водоподготовки способствуют разрыву коллоидных систем и повышенному выходу гидратно-связанной влаги. Нарушается агрегативная устойчивость избыточного активного ила, что способствует повышению влагоотдачи.

Помимо этого, частицы активного ила представляют собой амфотерный коллоид и, как и большинство микроорганизмов, имеют отрицательный заряд при значениях pH=4–9 [18]. Введение шлама создает pH=8,54, что соответствует представленному диапазону значений. Хлопья активного ила заряжены отрицательно, так как заряд полимерных веществ и микроорганизмов близок к нейтральному или небольшому отрицательному. При этом адсорбция внеклеточных полимеров на микроорганизмах происходит за счет нейтральных групп и не связана с изменением заряда.

На поверхности шлама присутствуют положительно заряженные катионы Ca^{2+}. Извлечение коллоидно-связанной влаги происходит с высокой эффективностью, так как при обработке шламом водоподготовки, выступающим как коагулянт, происходит нейтрализация заряда и укрупнение частиц и, как следствие, повышение влагоотдающих свойств и снижение удельного сопротивления осадка.

В результате предварительной обработки шламом и дальнейшего центрифугирования изменяется структура осадка избыточного активного ила. При отсутствии предварительной обработки шламом активный ил прочно удерживает влагу и характеризуется низкой влагоотдающей способностью, в то время как при введении шлама из избыточного активного ила извлекается коллоидно-связанная влага. В результате образуется твердая фаза, которая легко отделяется от фугата после центрифугирования.

Гигроскопическая или химически связанная влага, составляющая около 3–8 % от общей влаги, присутствующая в избыточном активном иле, извлекается только при термической утилизации.

Далее смешанный осадок, имеющий влажность не более 60–64 %, направляется на формование топливных гранул диаметром 5–7 мм с применением связующих технического лигносульфоната и технического крахмала. Гранулы такого размера разрабатываются для удобного перемещения пневмотранспортными установками, а также для повышения точности дозирования топлива. В качестве связующих предпочтение отдается экологически безопасным веществам с хорошими теплотворной способностью и сцепляющими свойствами.

Важными характеристиками полученных гранул, влияющих на эффективность термической переработки, являются технические и теплотехнические свойства, которые представлены в таблице 2.

По результатам исследований основным энергетическим показателем, характеризующим топливные гранулы, являлась теплота сгорания. По этой причине для термической переработки были выбраны гранулы с техническим лигносульфонатом, так как они имеют более высокое значение теплотворной способности. Полученное значение теплоты сгорания разработанных гранул сравнимо с теплотворной способностью торфа.

Таблица 2

Технические характеристики топливных гранул

Образцы со связующими	Крахмал технический (22 % масс.)	Лигносульфонат технический (22 % масс.)
Влажность, %	4,8±0,1	3,1±0,1
Насыпная плотность, кг/м^3	828	788
Зольность, %	29,2	27,9
Цвет золы	светло-серый	светло-коричневый
Прочность на истирание, %	0,5	0,1
Теплота сгорания, МДж/кг	9 672,6	10 345,5

Теплота сгорания топливных гранул, помимо влажности и зольности (внешнего балласта топлива), определяется соотношением основных элементов (C, H, N, S) и зависит от содержания горючих элементов (углерода, водорода и серы) [13].

Элементный состав топливных гранул с применением технического лигносульфоната показал следующие значения: $C^р$=30,1 %; $H^р$=2,9 %; $S^р$=1,1 %; $N^р$=1,24 %. К основным горючим элементам относят углерод (34,1 МДж/кг) и водород (120,5 МДж/кг). Сера, азот, содержащиеся в топливных гранулах, образуют токсичные оксиды серы и азота, которые необходимо извлекать из газовых выбросов после термической утилизации. При этом сера имеет более низкую теплоту сгорания (9,3 МДж/кг), а азот содержится в топливных гранулах в виде органических соединений и снижает теплотворную способность топлива.

Предложена технология утилизации осадков, основанная на предварительном обезвоживании и их термической переработке в циркулирующем кипящем слое с утилизацией тепла отходящих газов, образующихся после процесса сжигания активного ила и очистки уходящих газов (рис. 2).

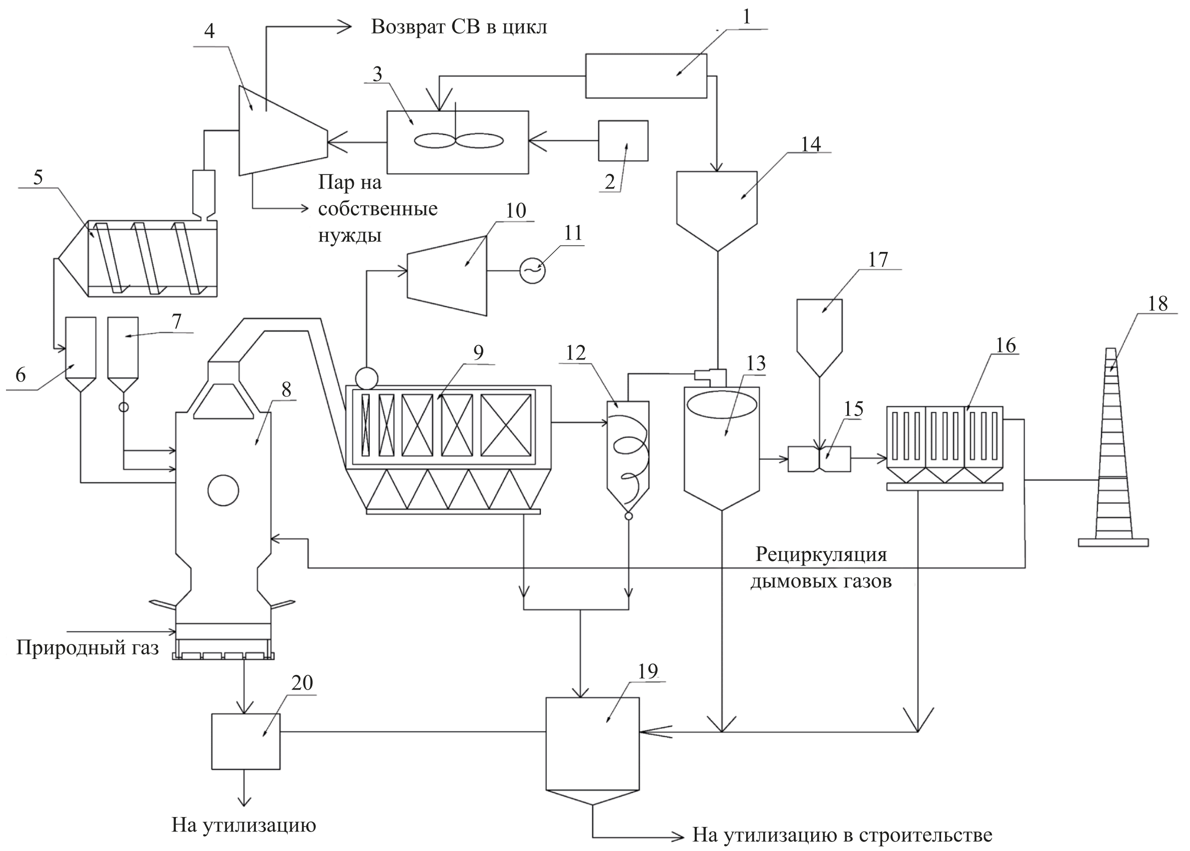


Рис. 2. Технологическая схема термической переработки осадков сточных вод:
1 — бункер хранения шлама; 2 — накопитель избыточного активного ила; 3 — бункер перемешивания осадка; 4 — декантер; 5 — гранулятор (экструдер); 6 — бункер хранения топливных гранул; 7 — бункер хранения инертного материала; 8 — котел с циркулирующим кипящим слоем; 9 — котел-утилизатор тепла дымовых газов; 10 — паровая турбина; 11 — электрогенератор; 12 — циклон; 13 — распыливающий абсорбер; 14 — бункер приготовления суспензии; 15 — аппарат ввода активного угля; 16 — рукавный фильтр; 17 — бункер хранения активного угля; 18 — дымовая труба; 19 — бункер сбора золы и продуктов реакций; 20 — бункер сбора шлака

Сжигание гранул из бункера хранения 6 происходит в котле с циркулирующим кипящим слоем 8, который характеризуется эффектом псевдоожижения или «кипения» за счет восходящего газового потока и интенсивного перемешивания частиц (с участием инертного материала из бункера 7 — песка (оксида кремния), обладающего высокой удельной теплоемкостью (0,835 кДж/(кг К)), стабилизирующего температуру процесса при качественном или количественном колебании топливных гранул на основе активного ила). Интенсивное кипение слоя способствует перемешиванию топливных гранул, окислителя, а также продуктов сгорания. Поэтому отсутствует необходимость дополнительного механического перемешивания гранул. Для воспламенения при пуске установки осуществляется подвод природного газа.

После сгорания газы с температурой около 900 –1 200 °C проходят котел-утилизатор 9, в котором происходит нагрев химически обессоленной воды до состояния пара. Пар направляется на турбину 10, с помощью электрогенератора 11 вырабатывается электрическая энергия. Частично пар из теплофикационных отборов направляется на собственные нужды предприятия. Газы, охлажденные до температуры 200–250 °C, направляются на очистку в фильтрующий блок, состоящий из механической очистки и оборудования очистки газовых выбросов абсорбционными и адсорбционными методами. Улавливание твердых дисперсных частиц осуществляется путем использования циклонов и рукавных фильтров. Охлажденные газы поступают в циклоны 12 для извлечения золы-уноса, а также инертного материала, выносимого вместе с дымовыми газами. Далее дымовые газы направляются в распыливающий адсорбер 13, в котором осуществляется полная их доочистка от хлористого водорода, сернистого газа, оксидов азота, а также частично от полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов. Для этого дозируется отход водоподготовки из бункера 1 в качестве сорбционного материала. После распыливающего адсорбера 13 температура уходящих газов составляет 140 °C. Доочистка от полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов осуществляется путем распыла активированного угля из бункера 17 в аппарате 15 перед рукавными фильтрами. Оставшаяся зола-уноса, а также непрореагировавший шлам и продукты химических реакций улавливаются с помощью рукавного

фильтра 16 и собираются в бункере сбора золы и продуктов реакций 19. После очистки дымовых газов с использованием рукавных фильтров 16 для очистки выбросов в атмосферу от оксидов азота применяется способ рециркуляции дымовых газов путем отбора 20–30 % газовых сред из газохода и их подачи в зону активного горения котла с циркулирующим кипящим слоем 8. После полной очистки уходящие газы направляются в дымовую трубу 18.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследований указывают на наличие энергетического потенциала разработанных гранул, который можно преобразовать в тепловую и электрическую энергию при условии экологической безопасности и минимизации негативного воздействия на окружающую природную среду.

Выбор котла с циркулирующим кипящим слоем является оптимальным решением для данной технологии из прочих существующих, так как интенсивное кипение слоя способствует перемешиванию топливных гранул, окислителя, а также продуктов сгорания. Поэтому отсутствует необходимость дополнительного механического перемешивания гранул. Для воспламенения гранул при пуске установки осуществляется подвод природного газа.

При использовании в котле с кипящим слоем топливных гранул на основе активного ила, шлама и связующего, происходит реакция термического разложения карбоната кальция при температуре 900–1 200 °С и дальнейшее связывание оксида серы с получением гипса с последующим его выносом. В слое будут протекать следующие реакции:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 + 178{,}8 \text{ кДж/моль};$$
$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 \rightarrow CaSO_4 - 500 \text{ кДж/моль}.$$

В органической части активного ила также присутствуют соединения хлора, а также фтора. В кипящем слое соединения хлора и фтора подвергаются высокотемпературному разложению (пирогидролизу) с превращением в хлористый и фтористый водород, которые далее взаимодействуют с оксидами кальция по следующим реакциям:

$$CaO + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O;$$
$$CaO + 2HF \rightarrow CaF_2 + H_2O.$$

Однако, при использовании данного решения требуется доочистка газовых выбросов, образующихся в котле с циркулирующим кипящим слоем, а именно: извлечение твердых частиц, образующихся при сжигании топливных гранул и выносимых из топки в виде золы-уноса с уходящими газами, а также удаление остаточных оксидов серы, азота, полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов.

Достоинством предложенного в статье подхода является возможность обезвреживания токсичных продуктов сгорания, которые образуются при сжигании.

Оксиды серы, хлористый и фтористый водород, а также полихлорированные дибензодиоксины и дибензофураны извлекаются с применением распыливающего адсорбера и адсорбционной доочистки дымовых газов активированным углем. Для проведения доочистки в распыливающем адсорбере традиционно дозируется суспензия известняка. Так как карбонат кальция является одним из основных компонентов шлама водоподготовки, то реализуется использование его в качестве реагента отхода теплоэнергетики. Важным условием является хорошее перемешивание капель суспензии с уходящими газами, а также обеспечение тонкого распыливания суспензии.

При поглощении SO_2 шламом теплоэнергетики протекают химические реакции:

$$H_2SO_3 \leftrightarrow SO_2 + H_2O;$$
$$H_2SO_3 + CaCO_3 + H_2O \rightarrow CaSO_3 \cdot H_2O \downarrow + CO_2 \uparrow.$$

Удаление полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов частично происходит в распыливающем адсорбере по следующим реакциям:

$$C_{12}H_nCl_{8-n} \cdot O_2 + (9 + 0{,}5n)O_2 \rightarrow (n-4)H_2O + 12CO_2 + (8-n)HCl;$$

$$C_{12}H_nCl_{8-n} \cdot O + (9{,}5 + 0{,}5n)O_2 \rightarrow (n-4)H_2O + 12CO_2 + (8-n)HCl.$$

Данный подход показал свою эффективность при сжигании твердых коммунальных отходов [19] и также может быть внедрен в практику термической утилизации осадков сточных вод.

Для полной доочистки дымовых газов от оксидов азота до значений нормативов допустимого выброса проводится частичная рециркуляция дымовых газов путем их подачи в зону активного горения котла. Этот подход позволяет снизить концентрацию NO_x до требуемых значений. Данный метод имеет широкое применение в топочных процессах энергетических котлов и также может применяться для котлов с циркулирующим кипящим слоем.

Применение предложенного в статье метода термического обезвреживания отходов производства — избыточного активного ила и шлама теплоэнергетики — различными отраслями промышленности позволяет сохранить природные виды органического топлива, снижает антропогенную нагрузку на окружающую природную среду. При этом решается двойная технико-экологическая задача: эффективная переработка отходов производств, ликвидация иловых

полей, шламонакопителей и сопутствующих проблем, связанных со складированием многотоннажных отходов и отчуждением территорий, а также получение дополнительной энергии с применением экологически безопасного способа термического обезвреживания.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет реализовать экологически безопасный способ утилизации при реализации природоохранных мероприятий, эффективно переработать многотоннажные отходы и реализовать принцип энергоресурсосбережения на промышленных и на коммунальных предприятиях, в которых присутствует система очистки сточных вод.

Список литературы / References

1. Солодкова А.Б., Собгайда Н.А., Шайхиев И.Г. Разработка технологии изготовления и использования адсорбента на основе отработанного активного ила для очистки сточных вод. *Вестник Казанского технологического университета.*2012;15(20):179–182.

Solodkova AB, Sobgaida NA, Shaikhiev IG. Development of Technology for the Manufacture and Use of an Adsorbent Based on Spent Activated Sludge for Wastewater Treatment. *Herald of Kazan Technological University.* 2012;15(20):179–182. (In Russ.).

2. Москвичева Е.В. Войтюк А.А., Доскина Э.П., Игнаткина Д.О., Юрьев Ю.Ю., Щитов Д.В. Совершенствование технологии очистки городских сточных вод с использованием сорбента на основе избыточного активного ила. *Инженерный вестник Дона.* 2015;2–2(36):2–28. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_85_moskvicheva.pdf_c2b9890852.pdf (дата обращения: 24.01.2024).

Moskvicheva EV, Voytyuk AA, Doskina EP, Ignatkina DO, Yuriev YY, Shitov DV. Improving the Technology of Municipal Wastewater Treatment with the Use of the Sorbent on the Basis of Surplus Sludge. *Engineering Journal of Don.* 2015;2–2(36):2–28. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_85_moskvicheva.pdf_c2b9890852.pdf (accessed: 24.01.2024) (In Russ.).

3. Jing Li, Lu Cao, Bing Li, Haiming Huang, Wei Yu, Cairui Sun, et al. Utilization of Activated Sludge and Shell Wastes for the Preparation of Ca-Loaded Biochar for Phosphate Removal and Recovery. *Journal of Cleaner Production*. 2023;382(1):135395. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135395

4. Jinyu Zeng, Duoduo Chen, Jing Zhu, Caicheng Long, Taiping Qing, Bo Feng, et al. Phosphate Recovery Using Activated Sludge Cyanophycin: Adsorption Mechanism and Utilization as Nitrogen-Phosphorus Fertilizer. *Chemical Engineering Journal*. 2023;476(11):146607. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146607

5. Чернова К.С., Баурина М.М., Градова Н.Б. Изучение влияния автолизатов активного ила метантенков на прочностные характеристики строительных материалов. *Успехи в химии и химической технологии.*2019;33(5(215)):47–48.

Chernova KS, Baurina MM, Gradova NB. The Influence of Activated Sludge Autolizates on the Strength Characteristics of Construction Materials. *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* 2019;33(5(215)):47–48. (In Russ.).

6. Taira Hidaka, Masato Nalamura, Fumiko Oritate, Fumitake Nishimura. Utilization of High Solid Waste Activated Sludge from Small Facilities by Anaerobic Digestion and Application as Fertilizer. *Water Science & Technology.* 2019;80(12):2320–2327. https://doi.org/10.2166/wst.2020.050

7. Qizi Fu, Dongbo Wang, Xiaoming Li, Qi Yang, Qiuxiang Xu, Bing-Jie Ni, et al. Towards Hydrogen Production from Waste Activated Sludge: Principles, Challenges and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;135(1):110283. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110283

8. Manu Agarwal, James Tardio, S. Venkata Mohan. Pyrolysis of Activated Sludge: Energy Analysis and Its Technical Feasibility. *Bioresource Technology.* 2015;178(2):70–75.https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.134

9. Гульшин И.А., Гогина Е.С. Одноиловая система низкокислородной технологии глубокой очистки сточных вод от соединений азота. Вода и экология: проблемы и решения. 2019;4(80):9–19. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.4.9-19

Gulshin I, Gorina E. Single-Sludge System of Advanced Low-Oxygen Wastewater Treatment with Nitrogen Compounds Removal. *Water and Ecology*. 2019;24(4):9–19. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.4.9-19 (In Russ.).

10. Anikin YuV, Shilkov VI. Modern Materials and Technologies of Industrial Wastewater Treatment. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2018;4(2):22–26. https://doi.org/10.15826/rjcst.2018.2.004

11. Jiahua Xia, Ting Rao, Juan Ji, Bijuan He, Ankang Liu, Yongjun Sun. Enhanced Dewatering of Activated Sludge by Skeleton-Assisted Flocculation Process. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(11):6540 https://doi.org/10.3390/ijerph19116540

12. Дремичева Е.С. Проблемы загрязнения водоемов нефтесодержащими сточными водами промышленных предприятий и варианты их решения. *Химическая безопасность*. 2021;5(2):66–77. https://doi.org/10.25514/CHS.2021.2.20003

Dremicheva ES. Problems of Pollution of Water Bodies with Oil-Containing Wastewater of Industrial Enterprises and Options for Their Solution. *Chemical Safety Science*. 2021;5(2):66–77. https://doi.org/10.25514/CHS.2021.2.20003 (In Russ.).

13. Ksenofontov BS, Kapitonova SN, Vasilieva YaS, Zhigalova AA. Engineering Problems of Dehydration and Disposal of Sewage Sludge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;864(1):012040. https://doi.org/10.1088/1755-1315/864/1/012040

14. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. *Водоотведение и очистка сточных вод.* Москва: АСВ; 2006. 704 с.

Voronov YuV, Yakovlev SV. *Wastewater Disposal and Treatment.* Moscow: ASV; 2006. 704 p. (In Russ.).

15. Николаева Л.А., Исхакова Р.Я., Травникова А.В., Нургалиев А.И. Очистка сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ с использованием отхода энергетики в качестве вторичного материального ресурса. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности.* 2023;1:93–100 https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2023.22.56.011

Nikolaeva LA, Iskhakova RY, Travnikova AV, Nurgaliev AI. Waste Water Treatment from Anionic Synthetic Surfactants Using Energy Waste as a Secondary Material Resource. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety.* 2023;1:93–100 https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2023.22.56.011 (In Russ.).

16. Ильин В.И., Бродский В.А., Колесников В.А. Разработка технологических решений для очистки сточных вод от загрязнений органической природы. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение.* 2015;4(88):16–19.

Il'in VI, Brodsky VA, Kolesnikov VA. Development of Technological Solutions for Wastewater Treatment of Organic Waste. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie.* 2015;4(88):16–19. (In Russ.).

17. Евстифеев Е.Н., Кужаров А.С., Попов Е.М. Разработка нового связующего для производства бездымных брикетов из антрацитовых штыбов. *Уголь*. 2014;(4):68−70.

Evstifeev EN, Kuzharov AS, Popov EM. Development of a New Binder for the Production of Smokeless Briquettes from Anthracite Culms. *Ugol'*. 2014;(4):68−70. (In Russ.).

18. Богданова А.Д. Методы очистки сточных вод. Биологическая очистка. *Труды межвузовской научно-технической конференции студентов и курсантов «Дни науки» Калининград, 2018*. Калининград: Издательство КГТУ; 2018. С. 343–348.

Bogdanova AD. Methods of Wastewater Treatment. Biological Purification. In: *Proceedings of the interuniversity scientific and technical conference of students and cadets "Days of Science" Kaliningrad, 2018.* Kaliningrad: KSTU Publishing House; 2018. P. 343–348. (In Russ.).

19. Тугов А.Н. Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор). *Теплоэнергетика.* 2021;(1):3–20. https://doi.org/10.1134/S0040363621010185

Tugov AN. Modern Technologies for the Thermal Treatment of Municipal Solid Waste, and Prospects for Their Implementation in Russia (Review). *Thermal Engineering.* 2021;(1):3–20.https://doi.org/10.1134/S0040363621010185 (In Russ.).

Об авторах:

Регина Яновна Исхакова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной экологии и безопасности труда Казанского государственного энергетического университета (420066, РФ, г. Казань, ул. Красносельская, 51), SPIN-код: 5799-6057, ORCID, ResearcherID, ScopusID, imreginaiskh@gmail.com

Артур Ильесович Нургалиев, студент 3 курса по направлению химической технологии Казанского государственного энергетического университета (420066, РФ, г. Казань, ул. Красносельская, 51), SPIN-код: 9360-6861, ORCID, artur_nurgaliev022@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Р.Я. Исхакова — постановка задачи исследования; анализ полученных экспериментальных результатов, описание теоретической части исследования.

А.И. Нургалиев — проведение экспериментальных исследований по определению характеристик, обезвоживанию и разработке топливных гранул, оформление научной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 15.02.2024
Поступила после рецензирования 07.03.2024
Принята к публикации 18.03.2024

About the Authors:

Regina Ya. Iskhakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Engineering Ecology and Labor Safety Department, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya Str., Kazan, 420066, RF), SPIN-code: 5799-6057, ResearcherID, ScopusID, ORCID, imreginaiskh@gmail.com

Artur I. Nurgaliev, 3rd year student in the specialty Chemical Technology, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya Str., Kazan, 420066, RF), SPIN-code: 9360-6861, ORCID, artur_nurgaliev022@mail.ru

Claimed Contributorship:

RYa Iskhakova: statement of the research task, analysis of the experimental results, description of the theoretical part of the study.

AI Nurgaliev: experimental studies on characterization, dewatering and development of fuel pellets, scientific article design.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 15.02.2024
Revised 07.03.2024
Accepted 18.03.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 519.688
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46

Научная статья

EDN: UYBHDM

Оценка экологических рисков мелководного водоема при проведении дноуглубительных работ

А.Е. Чистяков, И.Ю. Кузнецова ✉
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ inna.yu.kuznetsova@gmail.com

Аннотация

Введение. Усиление антропогенного воздействия на водные объекты требует комплексных решений для оценки экологических рисков. В литературе описаны этапы оценки, возможности экологического менеджмента и экспертного анализа. Исследуется моделирование рисков в данной сфере. При этом не изучен потенциал прогнозирования рисков для состояния воды и биоразнообразия в ходе часто выполняемых гидротехнических работ, например дноуглубления. Очевидны актуальность и важное прикладное значение такого подхода. Цель исследования — описание математической модели и программного комплекса, которые позволят оценивать риски для видового разнообразия экосистемы мелководного водоема при проведении работ в акватории.

Материалы и методы. Исходной точкой моделирования было описание процесса движения водных масс по уравнениям Навье — Стокса и неразрывности при переменной плотности. Уравнение диффузии-конвекции использовали для прогнозирования переноса взвешенных и растворенных частиц и оценки влияния примесей при эвтрофикации. Создавая алгоритм, задействовали термины и определения, принятые Росстандартом для управления рисками в чрезвычайной ситуации.

Результаты исследования. Для тестирования решения взяли данные о гидромеханических работах в районе порта Архангельска. Визуализировали поля концентрации взвешенных частиц, через 0, 15, 30 и 45 минут после выгрузки грунта. Установлено, что в процессе оседания взвеси область ее распространения значительно расширяется, и это полностью согласуется с данными натурных экспериментов при проведении дноуглубительных работ. Рассчитали и свели в таблицу объемы загрязненной воды при отвалах грунта на трех участках (при однократном сбросе и в сумме). Для оценки рисков Азовского моря брали максимальные концентрации загрязняющего вещества (меди), полученные в ходе замеров, моделирования и дистанционного зондирования Земли. В тестах для определения потенциальной опасности вещества исходили из того, что его концентрация вызывает реакцию у 50 % организмов. Для рыб потенциально опасная концентрация — 4мг/л при длительности влияния 96 ч. Для зоопланктона — 50 мг/л и 48 ч. Для микроводорослей 20 мг/л и 72 ч. Получено значение нормализованного риска — $R_n \approx 0{,}52$. Признан значимым риск концентрации меди 80 мкг/л в водах Азовского моря. Выявлена тенденция увеличения солености Азовского моря и стратификация водных масс по содержанию кислорода, что согласуется с результатами экспедиционных исследований.

Обсуждение и заключение. Разработанный подход позволил оценить изменение качества вод Азовского моря и описать некоторые трансформации акватории. Речь идет, в частности, о распространении взвешенных частиц и о районах их оседания. Указанные процессы обусловливают изменение рельефа дна, которое, в свою очередь, может привести к сокращению видового состава водоема.

Ключевые слова: гидрохимические параметры акватории, прогноз распространения и осаждения взвешенных частиц, моделирование распространения загрязняющих веществ, сокращение видового разнообразия водной экосистемы

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21–71–20050.

Для цитирования. Чистяков А.Е., Кузнецова И.Ю. Оценка экологических рисков мелководного водоема при проведении дноуглубительных работ. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):37–46. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46

Research Article

Assessment of Environmental Risks of a Shallow Water Body during Dredging Works

Alexander E. Chistyakov, Inna Yu. Kuznetsova ✉
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ inna.yu.kuznetsova@gmail.com

Abstract
Introduction. The increasing anthropogenic impact on water bodies necessitates integrated solutions to assess environmental risks. Literature describes the stages of risk assessment, the possibilities of environmental management, and expert analysis, while risk modeling in this field is being investigated. However, the potential for predicting risks to water quality and biodiversity during frequently performed hydraulic engineering works such as dredging has not been fully explored. The relevance and practical significance of such an approach are evident. This study aims to develop a mathematical model and software package that can assess risks to species diversity of the ecosystem of a shallow reservoir ecosystem during work in its water area.
Materials and Methods. The starting point for the simulation was a description of the movement of water masses based on the Navier-Stokes equations and the continuity equation at variable density. We used the diffusion-convection equation to predict the transfer of suspended and dissolved particles, as well as to assess the impact of impurities during eutrophication. To create the algorithm, we utilized the terms and definitions defined by the state standard for risk management in emergency situations.
Results. To test the solution, we took data on hydro-mechanical work in the port area of Arkhangelsk. We visualized the concentration fields of suspended particles 0, 15, 30 and 45 minutes after the soil was unloaded. It was found that during the settling of the suspension, the area of its distribution expanded significantly, and this was fully consistent with the data of field experiments during dredging. We calculated and tabulated the volumes of contaminated water at soil dumps in three sites (with a single discharge and in total). To assess the risks to the Sea of Azov, we used the maximum concentrations of pollutant (copper) obtained through measurements, modeling and remote sensing of the Earth. In tests to determine the potential danger of the substance, we assumed that its concentration caused a reaction in 50% of organisms. For fish, the potentially dangerous concentration was 4 mg/l with a duration of 96 hours of exposure. For zooplankton — 50 mg/l and 48 hours. For microalgae, 20 mg/l and 72 hours. The normalized risk value $R_n \approx 0.52$ was obtained. The risk of copper concentration of 80 µg/l in the waters of the Azov Sea was recognized as significant. A tendency towards increasing salinity and stratification of water masses in terms of oxygen content has been identified, consistent with the findings of expeditionary research.
Discussion and Conclusion. The developed approach has allowed us to assess the change in the quality of the waters of the Azov Sea and describe some transformations of the water area. Specifically, we are talking about the distribution of suspended particles and areas of their deposition. These processes can lead to changes in the bottom topography, which in turn can reduce the species diversity of the ecosystem.

Keywords: hydrochemical parameters of the water area, forecasting the spread and deposition of suspended particles, modeling the spread of pollutants, reducing the species diversity of the aquatic ecosystem

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

Funding Information. The research is done with the financial support from the Russian Science Foundation, scientific project No. 21–71–20050.

For Citation. Chistyakov AE, Kuznetsova IYu. Assessment of Environmental Risks of a Shallow Water Body during Dredging Works. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):37–46. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46

Введение. Развитие экономики сопровождается масштабными работами на территории водных объектов. В качестве примеров можно привести строительство Золотого, Русского и Крымского мостов, дноуглубление с целью расширения акватории для судоходства, прокладку подводных газо- и нефтепроводов и многое другое.

Обязательная часть таких проектов — оценка потенциального воздействия на экологию, прогнозирование рисков. В России эти вопросы регулируются Требованиями к материалам оценки воздействия на окружающую среду[1]. Кроме того, действует ГОСТ Р ИСО 14001–2016. Это официальный перевод международного стандарта ISO 14001:2015, определяющего деятельность предприятия и его системы экологического менеджмента при формировании заявки и реализации проекта. Стоит отметить, что действующая редакция стандарта направлена в большей степени на предупреждение чрезвычайной ситуации, а не на ликвидацию ее последствий.

Авторы работы [1] выделяют три ступени оценки риска для окружающей среды, в [2] описаны пять этапов. Исследование [3] фокусируется на рисках нефтяных и газовых компаний. Здесь же рассматриваются позитивные аспекты внедрения системы экологического менеджмента.

Значительная часть материалов посвящена развитию систем корпоративного экологического менеджмента для обеспечения международной или национальной безопасности в сфере экологии [4]. В [5] изучена корреляция экологической ответственности компании и стоимости ее акций на фондовом рынке. Аналогичная проблематика рассматривается в [6]. Речь идет о том, что экологическая ответственность французской компании сказалась на росте ее рыночной стоимости. Оценивалось влияние на капитализацию премии «Грин компани эвордс» (Green Company Awards), которой отмечают лучшие с точки зрения экологии объекты и предприятия [7]. Во многих случаях учитывается экспертный подход к оценке экологических рисков компаний [8]. Однако, у него есть существенные недостатки, связанные с субъективностью выводов и сложностью обработки большого объема информации в условиях неопределенности [9]. Поэтому более предпочтительны математические методы оценки риска.

В [10] описываются популярные подходы к оценке рисков с акцентом на индексный. В работе [11] рассмотрена модель для оценки экологических рисков с использованием теории доказательств Демпстера — Шафера, которая хорошо себя зарекомендовала при решении задач в условиях неопределенности. Тем не менее ее практическое применение осложняется необходимостью многих сложных расчетов, в том числе комбинированных. В статье [12] описана математическая модель на основе вероятностного подхода и определения интегральной величины оценки риска. В литературе не рассматриваются возможности прогнозирования комплекса рисков для состояния воды и биоразнообразия при выполнении гидротехнических работ. Однако именно такой подход следует признать актуальным, имеющим очевидное прикладное значение на современном этапе развития экономики.

Цель представленного исследования — описание математической модели и программного комплекса, которые позволяют оценивать уязвимости и риски для гидрохимических параметров акватории и видового разнообразия экосистемы водоема при углублении дна мелководного водоема. В первую очередь речь идет о прогнозировании распространения и осаждения взвешенных частиц. Эти процессы существенно влияют на рельеф донной поверхности. Кроме того, моделируются зоны распространения загрязняющих веществ. Их токсичность может стать фактором сокращения видового разнообразия водной экосистемы.

Материалы и методы. Для прогнозирования результатов антропогенного влияния на экосистему водоема (например, при проведении дноуглубительных работ) предлагается комплексная математическая модель движения взвешенных частиц в водной среде. Она учитывает ветровые течения, движение водной среды и стоки рек, геометрию акватории, турбулентный обмен, переменную плотность водной среды, которая может зависеть от солености или взвеси. При моделировании предлагается для каждой фракции взвеси принимать во внимание скорость осаждения, определяемую размером и формой частиц. Решение можно дополнить моделью эвтрофикации водоема, позволяющей учитывать влияние биогенных веществ на процессы, протекающие в водоеме.

Постановка задачи

Модель движения вод. Для описания процесса движения водных масс в акватории задействуем модель гидродинамики [13]. Она включает в себя представленные ниже выражения.

1. Уравнения движения Навье — Стокса:

$$\begin{gathered}
\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial u}{\partial z}\right),\\
\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial v}{\partial z}\right),\\
\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial w}{\partial z}\right)+g.
\end{gathered} \tag{1}$$

[1] *Об утверждении требований к материалам оценки воздействия на окружающую среду*. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: https://docs.cntd.ru/document/573339130 (дата обращения: 26.02.2024).

Здесь $V = \{u, v, w\}$ — вектор скорости движения водной среды [м/с]; P — давление [Па]; ρ — плотность [кг/м^3]; μ, ν — горизонтальная и вертикальная составляющие коэффициента турбулентного обмена [м^2/с]; g — ускорение силы тяжести [м/с^2].

2. Уравнение неразрывности в случае переменной плотности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0. \qquad (2)$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (1) и (2) подробно описаны в [13].

Модель распространения взвешенных частиц. Для прогнозирования переноса взвешенных и растворенных частиц используем уравнение диффузии-конвекции [14]:

$$\frac{\partial c_r}{\partial t}+\frac{\partial(uc_r)}{\partial x}+\frac{\partial(vc_r)}{\partial y}+\frac{\partial\left((w+w_{s,r})c_r\right)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial c_r}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial c_r}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial c_r}{\partial z}\right)+F_r, \qquad (3)$$

где c_r — концентрация r-й фракции взвеси [мг/л]; $w_{s,r}$ — скорость гравитационного осаждения r-й фракции взвеси [м/с]; F_r — функция интенсивности источников r-й фракции взвеси [мг/(л·с)].

Система уравнений (3) рассматривается при начальных и граничных условиях, подробно описанных в [14].

На основе системы (1)–(3) можно смоделировать процессы движения и осаждения взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ, а также рассмотреть возможность оптимизации площадей отвалов грунта. Модели целесообразно задействовать для сокращения вреда экосистеме водоема.

Модель эвтрофикации. Для оценки влияния примесей рассмотрим модель эвтрофикации вод на основе уравнения диффузии-конвекции [15]:

$$\frac{\partial S_r}{\partial t}+\frac{\partial(uS_r)}{\partial x}+\frac{\partial(vS_r)}{\partial y}+\frac{\partial\left((w+w_{s,r})S_r\right)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial S_r}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial S_r}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial S_r}{\partial z}\right)+F_r, \qquad (4)$$

где S_r — концентрация r-й примеси [мг/л]; $w_{s,r}$ — скорость гравитационного осаждения r-й примеси [м/с]; F_r — функция, описывающая интенсивность химико-биологического источника r-й примеси [мг/(л·с)].

Система уравнений (4) рассматривается при начальных и граничных условиях, которые приводятся в [15].

Можно использовать (4), в частности, для описания:

– влияния примесей, поступающих в водоем в результате антропогенного воздействия, например при аварийной ситуации или сбросе сточных вод;

– процессов окисления и восстановления марганца;

– окисления сероводорода;

– расчета концентрации растворенного в воде кислорода.

Данные о размещении источников можно получить с помощью дистанционного зондирования Земли.

Алгоритм оценки риска при антропогенном воздействии. Известные подходы к пониманию риска систематизированы в [16]. В данной работе используется определение риска в соответствии с ГОСТ Р 55059–2012[2]. Риск — это вероятность наступления чрезвычайной ситуации или ожидаемый размер ущерба, связанный с реализацией неблагоприятного исхода. Рассмотрим пример, когда в воду поступают примеси, негативно влияющие на экосистему:

$$R = Ef_S \cdot E_S. \qquad (5)$$

Здесь R — фактор риска; Ef_S — потенциальная опасность или токсичность примеси; E_S — фактор экспозиции или количество примеси в перерасчете на одну биологическую мишень. Для водоема фактор экспозиции можно рассчитать по формуле:

$$E_S = S \cdot P_S \cdot k_{BA}, \qquad (6)$$

где S — заданная или рассчитанная на основе модели (4) концентрация примеси; P_S — индекс скорости гидролиза; k_{BA} — фактор биоаккумулирования[3] или накопления (например, тяжелых металлов) [17].

Для определения потенциальной опасности примеси или загрязняющего вещества Ef_S в мировой практике принято использовать набор стандартизированных тестов[4]. В странах Европейского Союза выделяют описанные ниже количественные оценки токсичности вещества.

---

[2] *ГОСТ Р 55059–2012. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Термины и определения.* Москва: Стандартинформ, 2018. 8 с.

[3] *Methods for Measuring the Toxicity and Bioaccumulation of Sediment-Associated Contaminants with Freshwater Invertebrates*. Second Edition. Washington: United States Environmental Protection Agency; 1994. 148 p.

[4] *Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment. Appendix R10-2 Recommendations for Nanomaterials Applicable to Chapter R.10 Characterisation of Dose [concentration] — Response for Environment*. European Chemicals Agency. URL: https://echa.europa.eu/guidance-documents/guidance-on-information-requirements-and-chemical-safety-assessment (дата обращения: 26.02.2024).

– *NOEC* — no observed effect concentration, максимальная недействующая концентрация вещества. Как правило, эта концентрация по сравнению с контрольной не вызывает статистически значимого негативного эффекта (вероятность его наступления не превышает 0,05) в течение заданного времени воздействия.

– *LOEC* — lowest observed effect concentration, наименьшая наблюдаемая эффективная концентрация. Ее действие вызывает ответную реакцию тестируемых организмов. Это могут быть нарушения обмена веществ, роста, развития, размножения и даже гибель. Значения *LOEC* выше значений *NOEC*. Если известен эффект (процент эффекта) *LOEC*, можно примерно определить *NOEC*: $NOEC = LOEC / 2$ (при $10\,\% < LOEC < 20\,\%$). То есть если *LOEC* оказывает влияние на 10–20 % исследуемой популяции, то значение *NOEC* можно примерно определить как половину от *LOEC*.

– *MATC* — maximal acceptable toxicant concentration, максимально допустимая концентрация токсичного вещества. Это расчетный параметр, определяемый как среднее геометрическое *NOEC* и *LOEC*;

– EC_x — effect concentration (можно перевести как «концентрация эффекта, при которой наблюдается *x* % эффекта по сравнению с контрольной группой»). То есть это концентрация вещества, при которой наблюдается ответная реакция у *x* % тестируемых организмов. Например, при концентрации EC_{50} реагируют 50 % организмов. Для расчета данного критерия часто используется статистический метод (например, регрессионный анализ). При этом необходимо использовать достаточное количество групп концентраций (доз), поскольку точность оценки зависит от числа и интервала концентраций, а не от размера выборки для каждой концентрации. Наряду с аббревиатурой EC_x используют LC_x или $L(E)C_x$.

В рамках данного исследования рассматривались три набора тестов[5], применимые к природным водным объектам.

Результаты исследования. На основании рассмотренных моделей и подходов к оценке риска сформировали описанный ниже алгоритм из пяти шагов.

Шаг 1. Изучение характеристик акватории (географических, климатических, гидрологических). На данном шаге также рассматриваются потенциальные источники поступления взвеси и примесей. Это могут быть работы по расширению и очистке акватории, стоки рек, промышленные сбросы, судоходство и т.д. Следует определить возможный объем взвеси.

Шаг 2. Моделирование сценариев распространения взвесей и примесей на основе уравнений (1)–(4).

Шаг 3. Оценка токсического эффекта Ef_S по трем выбранным тестам.

Шаг 4. Оценка фактора риска для каждого вещества на основе (5)–(6) и расчет нормализованного фактора риска $R_n \in [0, 1]$. Для нормализации используется формула $(S - S_{\min})/(S_{\max} - S_{\min})$, где $S_{\min}$ и $S_{\max}$ — минимальная и максимальная концентрации рассматриваемого вещества.

Шаг 5. Формулирование предварительных выводов. Будем считать риск высоким при $R_n \geq 0{,}55$, значимым при $0{,}3 \leq R_n \leq 0{,}55$ и отсутствующим при $R_n < 0{,}3$.

Шаги 2–4 могут повторяться, если нужно определить оптимальный вариант проведения работ. Например, при дноуглублении можно моделировать распространение взвешенных веществ для различных точек сброса грунта и оценивать вред, причиняемый экосистеме.

Для численной реализации моделей (1)–(4) и описанного выше алгоритма оценки риска при антропогенном воздействии разработан программный комплекс на языке C++. Он объединяет четыре программных модуля. Ниже описано назначение каждого из них.

1. Расчет трехмерного вектора скорости движения водной среды на основе системы уравнений (1)–(2). Принимается во внимание сложная геометрия расчетной области.
2. Расчет на основе системы уравнений (3) переноса взвешенных частиц и их оседания. В данном случае имеется в виду многокомпонентная взвесь.
3. Моделирование эвтрофикации водоема на основе системы уравнений (4). Учитываются фито-, зоопланктон, а также 13 химических элементов и их соединений, которые существенно влияют на гидробиологические процессы водоема. Это растворенный кислород, железо, сера, сероводород, сульфаты, сульфиты, азот, аммонийный азот, нитриты, нитраты, фосфаты, силикаты, кремнекислота.
4. Оценка рисков антропогенного воздействия на основе описанного выше алгоритма.

Моделирование процессов движения и оседания взвеси при дампинге грунта. Разработанный программный комплекс моделирует процессы заиления судоходных каналов Дона. К тому же он позволяет изучать транспорт взвешенных частиц и переформатирование донной поверхности Азовского моря. Особое внимание уделяется прибрежной зоне и устьевым районам. Кроме того, софт использовался для оценки экологического состояния акваторий при проведении дноуглубительных работ в Белом море, в районе Двинской губы.

[5] *Soil and Sediment Risk Assessment of Organic Chemicals*. Technical Report No. 92. Brussels: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals; 2004. 145 p.

В качестве примера рассмотрим моделирование процессов движения и осаждения взвеси при проведении работ по расширению акватории [18]. С этой целью задействуем данные по работам в районе порта Архангельска. Для моделирования распространения и осаждения взвешенных частиц в качестве исследуемой области водоема взяли участок длиной 3 км вдоль направления течения. Его ширина — 1,4 км; глубина — 10 м.

Физические параметры водной среды и взвеси:

– скорость течения — 0,2 м/с;

– плотность взвешенного материала — 1600 кг/м^3;

– скорость осаждения взвеси — 2,042 мм/с;

– содержание частиц диаметром менее 0,05 мм в грунте — 26,83%;

– объем выгружаемого насыпного материала — 741 м^3.

Параметры расчетной области:

– шаг по горизонтальным пространственным координатам — 20 м;

– шаг по высоте — 1 м;

– расчетный интервал — 2 часа;

– шаг по времени — 1 минута.

На рис. 1 представлены поля концентрации взвешенных частиц (в мг/л), соответствующие разным интервалам времени. Трехмерный срез показывает сечение расчетной области плоскостью, которая проходит через точку выгрузки и образуется векторами, направленными вертикально и вдоль течения (течение — слева на право).

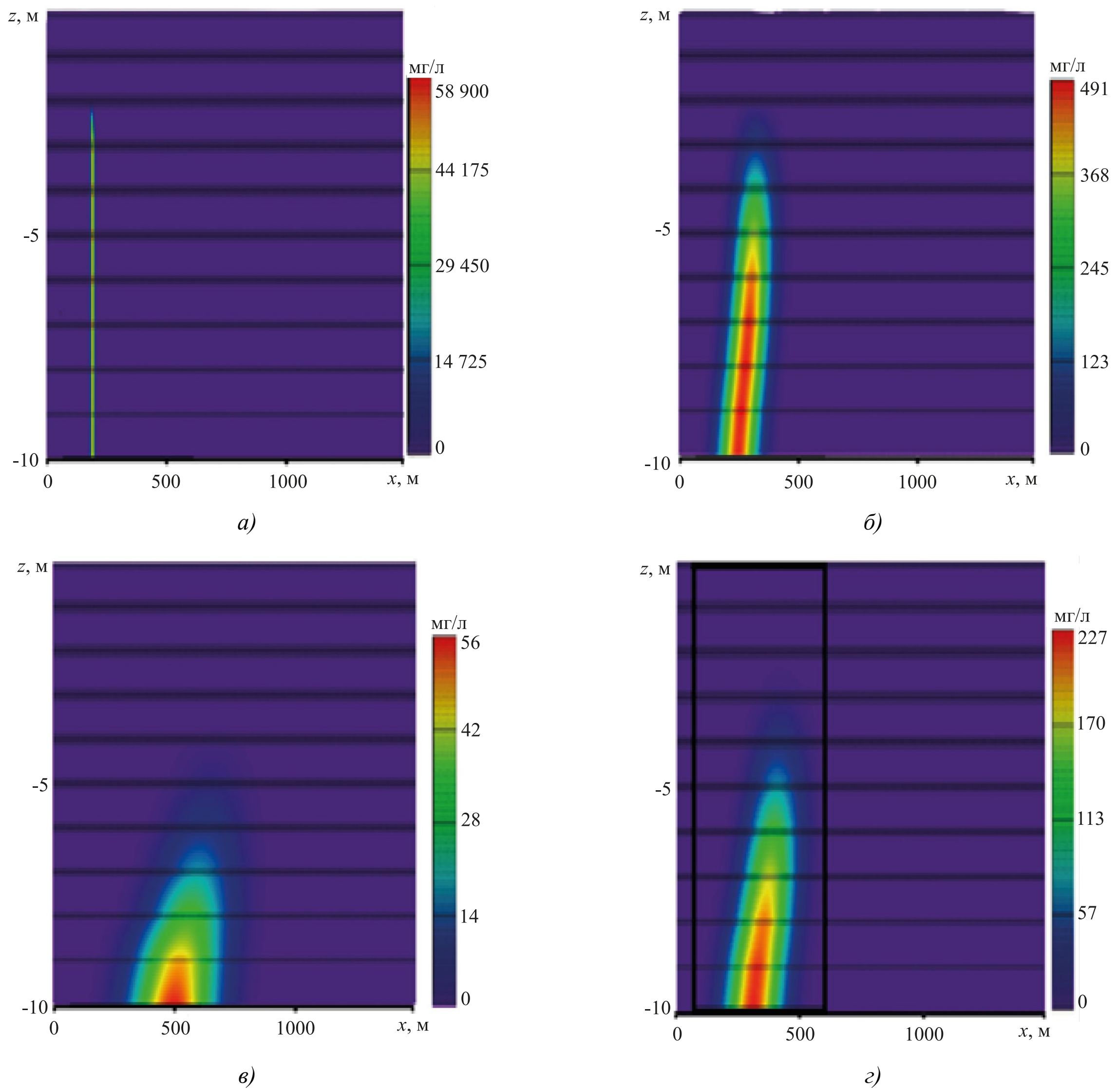


Рис. 1. Поля концентрации взвешенных частиц (в срезе «глубина — ширина» водоема) в разные интервалы времени с момента выгрузки грунта: *а* — $T = 0$; *б* — $T = 15$ мин; *в* — $T = 30$ мин; *г* — Т =45 мин. Цветная легенда показывает концентрацию взвеси. На горизонтальной оси — данные о ширине водоема, на вертикальной — о глубине

На основе полученных результатов рассчитали объем загрязненной воды при отвалах грунта на трех участках сброса (таблица 1).

Таблица 1

Объемы загрязненной воды при сбросе грунта на трех участках, млн м^3

Участок	Объем загрязненной воды при одном сбросе с учетом концентрации взвеси в воде			Объем сбросов	Общий объем загрязненной воды			
					с учетом концентрации взвеси в воде			Всего
	от 0,25 до 20 мг/л	от 20 до 100 мг/л	более 100 мг/л		от 0,25 до 20 мг/л	от 20 до 100 мг/л	более 100 мг/л	
1	0,89	0,245	0,15	124	110,36	30,38	18,6	159,34
2	0,813	0,202	0,105	50	40,65	10,1	5,25	56
3	0,889	0,24	0,15	45	40,01	10,8	6,75	57,56

Из таблицы видно, что при сбросе грунта высокая концентрация взвеси фиксируется в относительно малом объеме воды (это, допустим, часть воды, которая перемешана с грунтом). Большее количество воды имеет более низкую концентрацию (как, например, вода в непосредственной близости от сброшенного грунта). Значительные объемы воды загрязняются с меньшей концентрацией взвеси в процессе сброса грунта, его осаждения и переноса течением.

Участки сброса грунта и количество сбросов определялись по техническому заданию для работ по углублению акватории порта. Выявлены области водоема, в которых возможна гибель фито- и зоопланктона. Рассчитаны площади этих областей.

Оценка экологического состояния акватории Азовского моря. Экологическое состояние мелководного водоема оценивалось на примере Азовского моря. При исследовании использовали два подхода. Первый предполагает анализ баз постоянно пополняющихся данных. Это результаты экспедиционных изысканий авторов данной статьи в Азово-Черноморском бассейне. Второй связан с применением программного комплекса, который моделирует гидродинамику и гидробиологию водоема, а также процессы транспорта взвешенных частиц. По результатам сравнения полученных оценок проводились калибровка и верификация математических моделей для более точных оценок рисков.

Программный комплекс дает возможность оценить риски таких явлений, как:

– превышение предельно допустимых концентраций опасных загрязняющих веществ;

– бурный рост в процессе эвтрофикации вредоносных и токсичных водорослей («цветение» вод).

Таким образом, задействовав новый софт, можно сократить затраты на экспедиции, которые организуются для отбора проб воды.

Отметим также, что для контроля экологического состояния изучаемого водного объекта использовались данные дистанционного зондирования Земли.

Приведем пример обработки данных замеров, полученных в экспедиции. Рассмотрим процесс поступления меди от предприятий металлургической промышленности со стоком реки Дон в Азовское море. Медь — это тяжелый металл. Она может накапливаться в организме до опасных показателей.

При оценке рисков мелководного водоема (Азовского моря) использовались максимальные значения концентрации загрязняющего вещества, полученные в ходе замеров, математического моделирования и данных дистанционного зондирования Земли. В фиксированной точке водоема или исследуемой области выбирали конкретное измеренное или рассчитанное значение концентрации загрязняющего вещества. Предположим, что замеры выявили фактическую концентрацию взвеси в воде 80 мкг/л. В зависимости от участка и глубины забора проб концентрация меди в водах Азовского моря колеблется от 0,001 мкг/л до 100 мкг/л.

Индекс скорости гидролиза для меди примем равным $P_S = 1{,}5$, а фактор биоаккумулирования (накопления вещества) — $k_{BA} = 2$. Тогда согласно (6) фактор экспозиции $E_S = 240$ мкг/л.

Как отмечалось выше, для определения потенциальной опасности вещества Ef_S рассматриваются три теста:

– LC_{50} в течение 96 часов для рыб (судак) — 4 мг/л;

– LC_{50} в течение 48 часов для зоопланктона (дафнии) — 50 мг/л;

– LC_{50} в течение 72 часов для ингибирования роста микроводорослей — 20 мг/л.

Примем во внимание (5) и описанный выше алгоритм. Получим значение нормализованного риска $R_n \approx 0{,}52$. Таким образом, риск наличия меди в концентрации 80 мкг/л в водах Азовского моря можно охарактеризовать как потенциально значимый.

Также стоит отметить, что модель (1)–(4) позволила отследить тенденцию увеличения солености Азовского моря и стратификацию водных масс по содержанию кислорода. Это согласуется с результатами проведенных ранее экспедиционных исследований [19].

Остановимся отдельно на реализации 4-го шага алгоритма, то есть на оценке фактора риска для каждого загрязняющего вещества. Используя систему (5)–(6), расчет нормализованного фактора риска $R_n \in [0,1]$ и разработанный программный комплекс, вычислили максимальные значения концентраций основных загрязняющих веществ, характерных для Азовского моря.

Завершающий анализ рисков проводили по итогам обработки экспедиционных данных и результатов математического моделирования. Судя по индексу загрязненности воды, экологическое состояние Азовского моря улучшается. Ранее вода определялась как «значительно загрязненная», теперь как «умеренно загрязненная» [19].

Обсуждение и заключение. Предложенное софтверное решение дает возможность прогнозировать результаты антропогенного влияния на динамику качества вод Азовского моря. Разработанный программный комплекс позволяет моделировать распространение в акватории взвешенных частиц, определять основные районы их оседания. Такие процессы меняют рельеф дна. Следствием может быть существенное сокращение видового состава в районе оседания взвеси. Согласно полученным результатам, уменьшение площади отвала грунта при проведении дноуглубительных работ способно ограничить вред, причиняемый экосистеме водоема. Ориентируясь на полученные таким образом данные, можно в целом судить о потенциальных негативных последствиях, связанных с экономическим ущербом и рисками для здоровья людей.

Список литературы / References

1. Скворцова И.В., Смирнова И.С., Злобина З.А. Экологические риски в разрезе концепции устойчивого развития. *Скиф*. 2020;4(44):651–655.

Skvortsova IV, Smirnova IS, Zlobina ZA. Environmental Risks in the Concept of Sustainable Development. *Skif*. 2020;4(44):651–655. (In Russ.).

2. Okeukwu EK, Okeke OC, Irefin MO, Ezeala HI, Amadi CC. Environmental Impact Assessment and Environmental Risk Assessment: Review of Concepts, Steps and Significance. *IIARD International Journal of Geography and Environmental Management*. 2023;9(2):25–51. https://doi.org/10.56201/ijgem.v9.no2.2023.pg25.51

3. Сергеева И.Г., Схаб Н.А. Идентификация и оценка экологических рисков компаний нефтегазового сервиса. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. 2020;4(43):3–10. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2020-13-4-3-10

Sergeeva IG, Skhab NA. Identification and Assessment of Environmental Risks for Oil and Gas Service Companies. *Scientific journal NRU ITMO. Series "Economics and Environmental Management"*. 2020;4(43):3–10. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2020-13-4-3-10 (In Russ.).

4. Ionescu GH, Firoiu D, Pirvu R, Vilag RD. The Impact of ESG Factors on Market Value of Companies from Travel and Tourism Industry. *Technological and Economic Development of Economy*. 2019;25(5):820–849. https://doi.org/10.3846/tede.2019.10294

5. Li Cai, Chaohua He. Corporate Environmental Responsibility and Equity Prices. *Journal of Business Ethics*. 2014;125:617–635. https://doi.org/10.1007/s10551-013-1935-4

6. Ikram Radhouane, Mehdi Nekhili, Haithem Nagati, Gilles Paché. The Impact of Corporate Environmental Reporting on Customer-Related Performance and Market Value. *Management Decision*. 2018;56(7):1630–1659. https://doi.org/10.1108/MD-03-2017-0272

7. Lyon T, Yao Lu, Xinzheng Shi, Qie Yin. How Do Investors Respond to Green Company Awards in China? *Ecological Economics*. 2013;94:1–8. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.020

8. Yemelin PV, Kudryavtsev SS, Yemelina NK. The Methodological Approach to Environmental Risk Assessment from Man-Made Emergencies at Chemically Hazardous Sites. *Environmental Engineering Research*. 2021;26(4):200386. https://doi.org/10.4491/eer.2020.386

9. Ermakov S, Volkova L, Kapustina I. Ecosystems Measurement: Risk Assessment Methods and Ecological Safety Principles. *Transportation Research Procedia*. 2021;54:47–57. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.046

10. Yunna Han. Research on Mathematical Model of Environmental Assessment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;450:012035. https://doi.org/10.1088/1755-1315/450/1/012035

11. Hatefi SM, Basiri ME, Tamošaitienė J. An Evidential Model for Environmental Risk Assessment in Projects Using Dempster–Shafer Theory of Evidence. *Sustainability*. 2019;11(22):6329. https://doi.org/10.3390/su11226329

12. Сухорукова И.В., Чистякова Н.А. Математическая модель анализа факторов экологического риска. *Вестник университета*. 2023;(7):81–89. https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-7-81-89

Sukhorukova IV, Chistyakova NA. Mathematical Model for the Analysis of Environmental Risk Factors. *Vestnik Universiteta.* 2023;(7):81–89. https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-7-81-89 (In Russ.).

13. Alekseenko E, Roux B, Sukhinov A, Kotarba R, Fougere D. Coastal Hydrodynamics in a Windy Lagoon. *Computers and Fluids*. 2013;77:24–35. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.02.003

14. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Атаян А.М., Кузнецова И.Ю., Литвинов В.Н., Никитина А.В. Математическая модель процесса осаждения на дно многокомпонентной взвеси и изменения состава донных материалов. *Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета*. 2022;60:73–89. https://doi.org/10.35634/2226-3594-2022-60-05

Sukhinov AI, Chistyakov AE, Atayan AM, Kuznetsov IYu, Litvinov VN, Nikitina AV. Mathematical Model of Process of Sedimentation of Multicomponent Suspension on the Bottom and Changes in the Composition of Bottom Materials. *Izvestiya Instituta Matematiki i Informatiki Udmurtskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2022;60:73–89. https://doi.org/10.35634/2226-3594-2022-60-05 (In Russ.).

15. Никитина А.В., Сухинов А.И., Угольницкий Г.А., Усов А.Б., Чистяков А.Е., Пучкин М.В. и др. Оптимальное управление устойчивым развитием при биологической реабилитации Азовского моря. *Математическое моделирование.* 2016;28(7):96–106.

Nikitina AV, Sukhinov AI, Ugol'nitskii GA, Usov AB, Chistyakov AE, Puchkin MV, et al. Optimal Control of Sustainable Development in Biological Rehabilitation of the Azov Sea. *Matematicheskoe Modelirovanie.* 2016;28(7):96–106. (In Russ.).

16. Свиязова Т.Г. Управление рисками в системе менеджмента качества: экономическое содержание и классификация рисков. *Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика*. 2017;6:143–167.

Sviyazova TG. Risk Management in Quality Management System: Economic Content and Classification of Risks. *Moscow University Economic Bulletin.* 2017;6:143–167. (In Russ.).

17. Miletić A, Lučić M, Onjia A. Exposure Factors in Health Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in Soil and Sediment. *Metals*. 2023;13(7):1266. https://doi.org/10.3390/met13071266

18. Ковтун И.И., Проценко Е.А., Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Расчет воздействия на водные биоресурсы дноуглубительных работ в Белом море. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016;9(2):27–38.

Kovtun II, Protsenko EA, Sukhinov AI, Chistyakov AE. Calculating the Impact on Aquatic Resources Dredging in the White Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2016;9(2):27–38. (In Russ.).

19. Сухинов А.И., Тишкин В.Ф., Иванов К.А., Лапин Д.В., Чистяков А.Е. *Опыт моделирования гидрофизических процессов в Азовском море*. В: Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. Москва: Изд-во МГУ; 2012. С. 156–164.

Sukhinov AI, Tishkin VF, Ivanov KA, Lapin DV, Chistyakov AE. Experience in Modeling Hydrophysical Processes in the Azov Sea. In: *Supercomputing Technologies in Science, Education and Industry.* Moscow: Publishing house of Moscow State University; 2012. P. 156–164. (In Russ.).

Об авторах:

Александр Евгеньевич Чистяков, доктор физико-математических наук, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 1135-8843, ORCID, ResearcherID, ScopusID, cheese_05@mail.ru

Инна Юрьевна Кузнецова, старший преподаватель кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8806-8134, ORCID, ResearcherID, ScopusID, inna.yu.kuznetsova@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

А.Е. Чистяков — описание теоретической части исследования, разработка программных модулей для расчета процессов гидродинамики и гидробиологии.

И.Ю. Кузнецова — разработка программных модулей для расчета процессов движения и оседания взвешенных частиц и оценки параметра риска антропогенного влияния, оформление научной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 13.03.2024
Поступила после рецензирования 02.04.2024
Принята к публикации 16.04.2024

About the Authors:

Alexander E. Chistyakov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Computer Software and Automated Systems Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-код: 1135-8843, ORCID, ResearcherID, ScopusID, cheese_05@mail.ru

Inna Yu. Kuznetsova, Senior Lecturer of the Mathematics and Informatics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-код: 8806-8134, ResearcherID, ScopusID, ORCID, inna.yu.kuznetsova@gmail.com

Claimed Contributorship:

AE Chistyakov: description of the theoretical part of the study, development of software modules for calculating processes of hydrodynamics and hydrobiology.

IYu Kuznetsova: development of software modules for calculating the processes of movement and sedimentation of suspended particles and assessing the risk parameter of anthropogenic influence; design of the scientific paper.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 13.03.2024
Revised 02.04.2024
Accepted 16.04.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 641-614.3
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-47-56

Научная статья

EDN: VCFCDM

Оценка и прогнозирование фитосанитарных рисков в лесах Иркутской области

С.С. Тимофеева[1] ✉, **С.В. Тенчиков**[1, 2], **С.С. Тимофеев**[1]
[1] Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация
[2] Отдел фитосанитарного контроля по Иркутской области Управления Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору по Иркутской области и Республики Бурятия, г. Иркутск, Российская Федерация
✉ sstimofeeva@mail.ru

Аннотация
Введение. Экспорт древесины вносит существенный вклад в бюджет Иркутской области, что требует обеспечения сохранения и воспроизводства леса. Одним из важнейших направлений профилактической деятельности по сохранению лесов является анализ фитосанитарного риска. С его помощью устанавливают, являются ли бесконтрольно размножающиеся насекомые вредными, какова вероятность их интродукции, распространения, а также величина экономических последствий. С позиции современной прикладной техносферной рискологии необходимо осуществлять прогнозную оценку, просчитывать приемлемость рисков и разрабатывать методы управления ими, сочетающими экономические и мониторинговые подходы. Целью представленной работы явилась оценка и прогнозирование фитосанитарных рисков на территории Иркутской области и потенциального ущерба лесному хозяйству и экономике, а также разработка мероприятий по их снижению.

Материалы и методы. Для анализа использовали результаты обследований лесных массивов Иркутской области, проведенных в 2021–2023 годах, проведенных с участием авторов данной статьи. Они включали в себя выявление и идентификацию вредоносных насекомых, а также определение площади их распространения по ГОСТ 34309–2017 и методике, согласованной органом фитосанитарного контроля. Помимо этого, использованы данные официальной статистики Федеральной таможенной службы России за 2021–2023 г[1].

Результаты исследования. В лесничествах Усть-Илимского района были обнаружены популяции карантинных вредных организмов, включенные в Единый перечень карантинных объектов Евразийского экономического союза, такие как: малый чёрный еловый усач, большой чёрный еловый усач, чёрный сосновый усач, сибирский шелкопряд. Рассчитан фитосанитарный риск и оценена карантинная фитосанитарная зона с учетом буферной зоны.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о неблагоприятной фитосанитарной обстановке на изученных территориях. Выраженная зараженность по выявленным вредным насекомым в Усть-Илимском районе, по сравнению с территориями, взятыми для сравнения, позволяет спрогнозировать карантинные зоны и возможные потери лесозаготовителей. Варианты управления фитосанитарными рисками следует выбирать, исходя из их эффективности в уменьшении скорости распространения карантинных организмов и снижении рисков до приемлемого уровня. Наиболее экологически целесообразным вариантом управления фитосанитарными рисками являются санитарные рубки со своевременной уборкой ветровала и поврежденных пожаром деревьев, установка феромонных ловушек, обработка биопрепаратами.

Ключевые слова: хвойные деревья, вредители, насекомые, гибель, болезни леса, очаги поражения, фитосанитарный риск, карантинная зона

[1] *Таможенная статистика.* Федеральная таможенная служба. URL: https://customs.gov.ru/statistic (дата обращения: 20.02.2024).

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам фитосанитарного контроля и таможенной службы за проявленный интерес к обсуждаемой теме и благодарят редакционную коллегию журнала и рецензента за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Для цитирования. Тимофеева С.С., Тенчиков С.В., Тимофеев С.С. Оценка и прогнозирование фитосанитарных рисков в лесах Иркутской области. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):47–56. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-47-56

Research Article

Assessment and Forecasting of Phytosanitary Risks in the Forests of the Irkutsk Region

Svetlana S. Timofeeva[1] ✉, Semen V. Tenchikov[1,2], Semen S. Timofeev[1]
[1] Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation
[2] Department of Phytosanitary Control in the Irkutsk Region of the Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Supervision in the Irkutsk Region and the Republic of Buryatia, Irkutsk, Russian Federation
✉ sstimofeeva@mail.ru

Abstract
Introduction. Timber export plays a significant role in the budget of the Irkutsk region. To ensure the continued and sustainable use of forest resources, it is essential to implement preventive measures for forest conservation. One such measure is the analysis of phytosanitary risk, which helps to identify potentially harmful insects and determine the likelihood of their introduction and spread, as well as the potential economic consequences. From the perspective of applied riskology, it is necessary to carry out a predictive assessment, calculate the acceptability of risks and develop methods for managing them, combining economic and monitoring approaches. The aim of the presented work was to assess and predict phytosanitary risks in the Irkutsk region and potential damage to forestry and the economy, as well as to develop measures to reduce them.
Materials and Methods. For this analysis, we used the results of forest surveys conducted in the Irkutsk region in 2021–2023 with the participation of the authors of this article. These surveys included the identification and detection of harmful insects, as well as the determination of their distribution areas according to GOST 34 309–2017 and the methodology approved by the phytosanitary control authority. Additionally, data from official statistics from the Federal Customs Service of Russia for 2021–2023 were used.
Results. We found populations of quarantine pests listed in the Unified List of Quarantine Objects of the Eurasian Economic Union in the forests of Ust-Ilimsky district, such as *Monochamus sutor, Monochamus sartor, Monochamus galloprovincialis, Dendrolimus superans*. We calculated the phytosanitary risk and assessed the quarantine phytosanitary zone, taking into account the buffer zone.
Discussion and Conclusion. The results of the analysis suggest an unfavorable phytosanitary situation in the studied areas. The high infestation of the detected harmful insects in the Ust-Ilimsky district compared to the reference areas indicates the potential for quarantine zones and losses for loggers. To manage phytosanitary risks, it is important to select options that are effective in reducing the spread of quarantine organisms and minimizing risks to an acceptable level. Sanitary logging with timely removal of wind-damaged and fire-affected trees, as well as the use of pheromone traps and biological products, are environmentally friendly options for managing phytosanitary risks.

Keywords: coniferous trees, pests, insects, death, forest diseases, lesions, phytosanitary risk, quarantine zone

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the staff of the phytosanitary control and customs service for their interest in the topic under discussion and would like to extend their thanks to the Editorial board of the journal and the reviewer for their professional analysis and recommendations regarding the article.

For Citation. Timofeeva SS, Tenchikov SV, Timofeev SS. Assessment and Forecasting of Phytosanitary Risks in the Forests of the Irkutsk Region. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):47–56. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-47-56

Введение. На состояние лесных насаждений, которыми богата Иркутская область, негативное влияние оказывают хвоегрызущие и другие вредные насекомые. Их размножение приводит к гибели, усыханию лесов и существенным экономическим потерям лесопользователей. Эти потери зависят от породного состава лесов, физиологического состояния деревьев, площади массового размножения вредителей, их видового состава, плотности популяции и погодных условий. К факторам негативного воздействия на леса относятся хозяйственно опасные вредные насекомые, фитопатогенные вирусы, грибы, пожары, ветровалы, засухи,

затопление, промышленные выбросы, рекреационная нагрузка и т.д. [1]. Ранее авторами были проанализированы экологические риски лесных пожаров в Байкальском регионе и предложены меры управления ими [2, 3], риски затопления [4]. Однако, кроме пожаров и затоплений, значительный ущерб лесам региона наносят появление, неконтролируемое размножение и распространение по территории вредных организмов. На территориях обязательно должна проводиться количественная оценка рисков и угроз санитарной безопасности в лесах, разрабатываться и реализоваться мероприятия по управлению фитосанитарными рисками.

Процедура анализа фитосанитарных рисков, в соответствии с требованиями международных и российских стандартов, представляет собой процесс определения масштабов проникновения и распространения вредоносных организмов в Российской Федерации, а также связанных с этим возможных последствий [5, 6]. Перечень карантинных вредоносных организмов установлен законодательно федеральным законом «О карантине растений»[2], введенным в действие 1 января 2019 года (ГОСТ 34309–2017[3]).

Нормативно-правовые акты, в том числе отраслевые[4], регламентируют требования к процедуре и критериям оценки фитосанитарных рисков на основе балльной оценки вероятности проникновения, акклиматизации, введения временных ограничений на экспорт лесной продукции, потенциального экономического ущерба, а также устанавливают способы управления такими рисками и защитные меры, направленные на предупреждение распространения и мониторинг вредоносных организмов. Главное при выявлении вредоносных организмов — их изоляция и уничтожение. В список карантинных организмов включены вредители [7] и возбудители болезней растений [8], а также растения сорняки [9]. Важно проводить фитосанитарный надзор на границе при ввозе и вывозе растительной продукции [10]. Следует вести мониторинг и устанавливать фитосанитарные зоны — территории, где обнаруживаются карантинные организмы, своевременно принимать меры по их изоляции и уничтожению. Это крайне актуально для основных районов лесозаготовок России, а именно Иркутской области, где сосредоточены преимущественно хвойные леса, работают целлюлозно-бумажные комбинаты, нуждающиеся в качественном сырье, заключены долгосрочные договоры на поставку древесины за рубеж.

Комплексная оценка фитосанитарных рисков и экономических экспортных потерь на территории Иркутской области ранее не проводилась. Поэтому целью данной работы явилась оценка, прогнозирование фитосанитарных рисков на территории Иркутской области и потенциального ущерба лесному хозяйству, экономике, а также разработка мероприятий по их снижению.

Материалы и методы. В основу работы положены материалы обследований, выполненных авторами в период с 2020 по 2023 гг., по выявлению и идентификации вредоносных насекомых в лесных массивах Иркутской области. Оценивали площади распространения вредителей по ГОСТ 34309–2017 и методике фитосанитарного надзора. Исходными данными для оценки экономических потерь послужили статистические данные Федеральной таможенной службы России[5] и администрации Иркутской области за 2020-2022 годы[6, 7].

Оценку фитосанитарного риска проводили по ГОСТ 34309–2017 и методике, согласованной органом фитосанитарного контроля по нижеприведенному алгоритму[8] (рис. 1).

Для анализа использовали результаты обследования лесных массивов лесничеств Иркутской области, проведенного в 2021–2023 годах с участием авторов. Оно включало выявление и идентификацию вредоносных насекомых, определение площади их распространения по ГОСТ 34309–2017 и методике, согласованной органом фитосанитарного контроля. Помимо этого, использованы данные официальной статистики Федеральной таможенной службы России за 2021–2023 гг[9].

[2] *О карантине растений.* Федеральный закон № 206-ФЗ. от 21.07.2014 Консультант плюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165795/ (дата обращения: 08.02.2024).

[3] ГОСТ Р 57973–2017. *Санитарная безопасность в лесах. Термины и определения.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200157752 (дата обращения: 08.02.2024).

[4] *Об утверждении Методики осуществления анализа фитосанитарного риска.* Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации № 46 от 05.02.2018 г. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/542618212 (дата обращения: 08.02.2024).

[5] *Экспорт России важнейших товаров. Таблицы.* Таможенная статистика. Федеральная таможенная служба. URL: https://customs.gov.ru/statistic/eksport-rossii-vazhnejshix-tovarov (дата обращения: 20.02.2024).

[6] *Российский статистический ежегодник.* Москва: Федеральная служба государственной Статистики; 2022. 691 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ejegodnik_2022.pdf (дата обращения: 20.02.2024).

[7] Отдел информмационно-статистических услуг. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области. URL: https://38.rosstat.gov.ru/inform_uslugi (дата обращения: 20.02.2024).

[8] ГОСТ Р 57973–2017. *Санитарная безопасность в лесах. Термины и определения.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200157752 (дата обращения: 08.02.2024).

[9] *Таможенная статистика* Федеральная таможенная служба. URL: https://customs.gov.ru/statistic (дата обращения: 08.02.2024).



Рис. 1. Алгоритм оценки фитосанитарного риска

Объектами исследования явились:

– черный сосновый усач (Monochamus Galloprovicialis Oliv.), вызывающий заболевание известное как «синева древесины». Присутствие вредителей оценивали в августе по наличию отверстий и выбуренной муке;

– сибирский шелкопряд (Dendrolimus Sibiricus), являющийся хвоегрызущим насекомым и уничтожающим хвойные леса. Достаточно появление 300–500 особей насекомых на одном дереве для полного его обесхвоения деревьев. Появление гусениц оценивали в конце июля и начале августа[10];

– уссурийский полиграф (Polygraphus Proximus Blandford), относящийся к короедам, приводящий к повреждению коры хвойных деревьев, сопровождающееся покраснением и усыханием, способен выживать при низких температурах до –50 °С.

Численность жуков на одном заражённом дереве в очагах инвазии может исчисляться от нескольких сотен до нескольких тысяч особей[11]. Наличие вредителя фиксировали по наличию прогрызенных ходов на ослабленных и усыхающих деревьях [5].

Оценку потенциального ущерба (ПУ) за заданный период времени определяли по следующей формуле:

$$\text{ПУ} = \frac{\text{ВП} \cdot \text{ВА} \cdot \text{ПЭВ}}{100};$$

где ВП — показатель вероятности проникновения; ВА — показатель вероятности акклиматизации; ПЭВ — показатель потенциальной экономической вредоносности [11].

Определение плотности заражения лесоматериалов вредными насекомыми выполняли по известной методике[12]. Количество и способ отбора образцов (проб) определяли в соответствии с ГОСТ 12430–2019[13].

Обработку полученных результатов проводили математическими методами, базируясь на корреляционной и регрессионной оценке.

Результаты исследования. При выполнении мониторинговых исследований с участием авторов на территории Иркутской области были выявлены участки, где активно размножались вредоносные насекомые, такие как сибирский шелкопряд, уссурийский полиграф, малый черный еловый усач, большой черный еловый усач, черный еловый усач, черный крапчатый усач. Наибольшую площадь поражения занимали очаги сибирского шелкопряда (до 92 %).

В ходе обследований были зафиксированы очаги поражения сибирской пихты уссурийским полиграфом, являющимся для данной территории инвазивным организмом. Вспышки массового размножения данного организма наносят серьезный ущерб сибирской пихте — одному из важных видов хвойных деревьев, широко востребованному на международном рынке лесоматериалов и занимающим незначительные площади на

[10] СТО ВНИИКР 2.016–2016. *Сибирский шелкопряд. Dendrolimus Sibiricus Tschetverikov. Правила проведения карантинных фитосанитарных обследований подкарантинных объектов и установления карантинной фитосанитарной зоны и карантинного фитосанитарного режима*. URL: https://oi25.vniikr.ru/documents (дата обращения: 08.02.2024).

[11] СТО ВНИИКР 2.054—2017. *Уссурийский полиграф Polygraphus Proximus Blandford. Правила проведения карантинных фитосанитарных обследований подкарантинных объектов и установления карантинной фитосанитарной зоны и карантинного фитосанитарного режима*. URL: https://oi25.vniikr.ru/documents (дата обращения: 08.02.2024).

[12] *Об утверждении Методических указаний по осуществлению лесозащитного районирования*. Приказ Федерального агентства лесного хозяйства № 179 от 25 апреля 2017 г. Консультант плюс. URL: https://base.garant.ru/71723350/ (дата обращения: 08.02.2024).

[13] ГОСТ 12430–2019. *Карантин растений. Методы и нормы отбора образцов подкарантинной продукции при карантинном фитосанитарном досмотре и лабораторных исследованиях*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200168062 (дата обращения: 08.02.2024).

территории Иркутской области [12]. При детальном обследовании пихтарников и оценке их по шкале состояния при поражении уссурийским полиграфом установили, что на обследованном участке зафиксировано только 20 % здоровых, 40 % ослабленных и 15 % сильно ослабленных деревьев. На рис. 2 приведены данные по распределению деревьев пихты сибирской по категориям состояния при повреждении уссурийским полиграфом[14]. Расчет происходил по известной методике[15]. Установлено, что на обследованной территории фиксируется уже до 10 % сухостоя.

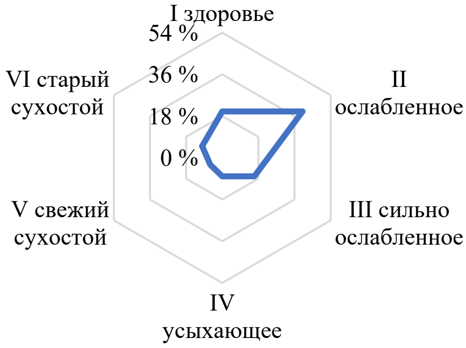
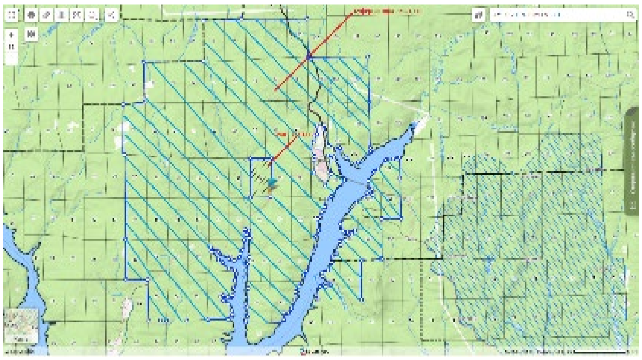
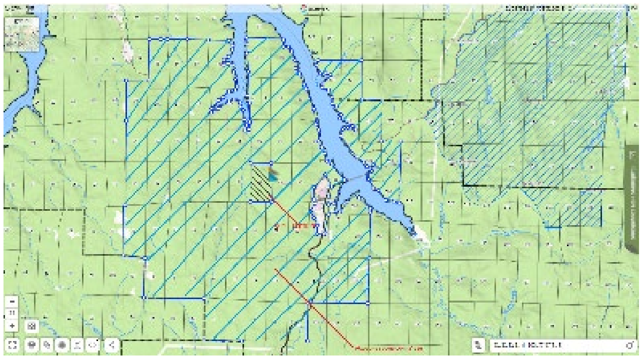


Рис. 2. Категории состояния деревьев пихты сибирской, поврежденные уссурийским полиграфом

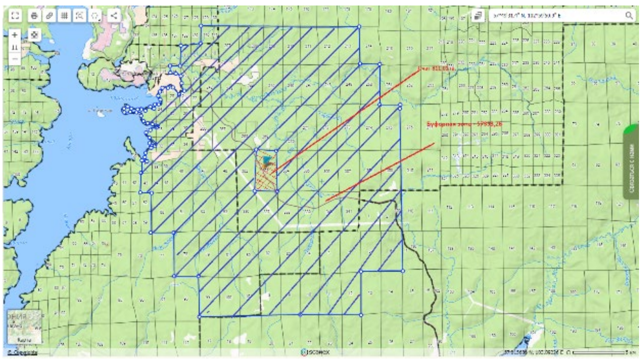
При выполнении мониторинговых исследований в летне-осенний период 2023 года в Усть-Илимском районе в Северном лесничестве были выявлены популяции карантинного объекта сибирского шелкопряда (Dendrolimus Sibiricus Tschetverikov) на следующих локациях: Тубинское участковое лесничество, площадь очага — 758,13 га; Сосновское участковое лесничество, площадь очага — 811,01 га. Для каждого участка рассчитаны зоны фитосанитарного риска. Пример расчета приведен на рис. 3, а в таблице 1 представлены площади зон фитосанитарного риска.



а)



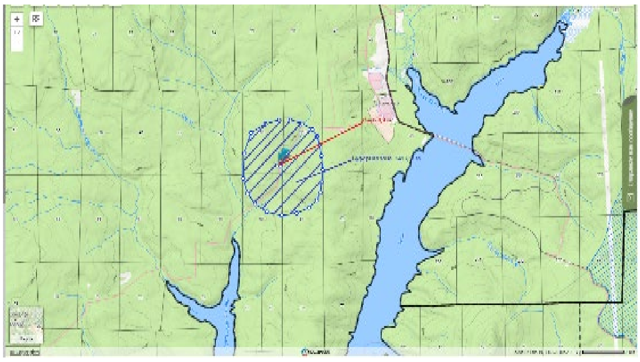
б)



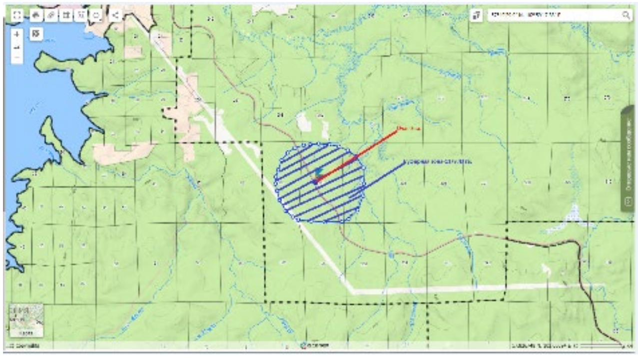
в)

Рис. 3. Зона фитосанитарного риска в лесных угодьях Северного лесничества по сибирскому шелкопряду:
а — Северное лесничество, Тубинское участковое лесничество, Кедровская дача, 43 квартал-очаг;
б — Северное лесничество, Тубинское участковое лесничество, Тубинская дача, 116 квартал-очаг;
в — Северное лесничество, Тубинское участковое лесничество, Кедровская дача, 303 квартал-очаг

[14] *Уссурийский полиграф в лесах Сибири (распространение, биология, экология, выявление и обследование поврежденных насаждений).* Методическое пособие. Томск-Красноярск: УМИУМ; 2015. 48 с.
[15] Там же. С. 3–46.



а)



б)



в)

Рис. 4. Зона фитосанитарного риска в лесных угодьях Северного лесничества по большому черному еловому усачу:
а — Северное лесничество, Тубинское участковое лесничество, Кедровская дача;
б — Северное лесничество, Сосновское участковое лесничество, Карапчанская дача;
в — Северное лесничество, Тубинское участковое лесничество, Тубинская дача

Таблица 1

Зоны фитосанитарного риска в Северном лесничестве Усть-Илимского района
по сибирскому шелкопряду

Локация риска	Зона фитосанитарного риска, га
43 квартала Северного лесничества, Тубинского участкового лесничества	56 951,66
116 квартала Северного лесничества, Тубинского участкового лесничества	57 180,09
303 квартал Северного лесничества, Тубинского участкового лесничества	57 353,26

На территории этого же лесничества обнаружены очаги поражения большим черным еловым усачом (Monochamus Urussovi Fisch) и черным сосновым усачом (Monochamus Galloprovincialis Oliv.). На рис. 4 и в таблице 2 приведены зоны фитосанитарного риска по данным насекомым.

Таблица 2

Зоны фитосанитарного риска в Северном лесничестве Усть-Илимского района по большому черному еловому усачу

Локация риска	Зона фитосанитарного риска по черному сосновому усачу, га	Зона фитосанитарного риска по большому черному еловому усачу, га
Северное лесничество, Тубинское участковое лесничество, Кедровская дача	1 379,43	1 343,18
Северное лесничество, Тубинское участковое лесничество, Тубинская дача	1 706,38	1 266,66
Северное лесничество, Сосновское участковое лесничество, Карапчанская дача	1 821,96	1 263,73

Площадь очагов карантинных вредителей, которые действовали на территории Иркутской области в 2023 г. была 76 752,4 га, при этом очаги сибирского шелкопряда составляли 92 % от площади очагов всех карантинных видов.

При таможенном досмотре древесины, подготовленной к экспорту из данных лесничеств, были обнаружены личинки черного соснового усача, сибирского шелкопряда, уссурийского полиграфа. Расчетами установлено, что плотность распространения живых личинок может достигать 540 $м^3$ подкарантинной продукции, что выходит за пределы всего объема продукции, т.е. распространение вредителя перейдет на соседние участки, расположенные вблизи лесозаготовителей.

В пределах зон фитосанитарного риска ограничили деятельность лесозаготовителей и вывоз древесины за пределы установленной зоны.

Экономические потери от недопоставки древесины реализации фитосанитарных рисков в пределах исследованного лесничества составили 1 276 тыс. долларов при экспорте в Китай по средней цене 220 долларов за 1 $м^3$ древесины хвойных пород.

Обсуждение и заключение. Показано, что на территории Иркутской области в 2023 году сложилась неблагоприятная ситуация и фиксировались высокие фитосанитарные риски по ряду вредителей таких как сибирский шелкопряд, черный сосновый усач, большой черный еловый усач и уссурийский полиграф.

Усть-Илимский район занимает первое место среди обследованных территории по общей площади поражения. Наибольшие очаги размножения сибирского шелкопряда зафиксированы в Тубинском участковом лесничестве. Зоны фитосанитарного риска по черному сосновому усачу составляют 2,7 % от общей площади поражения и сосредоточены преимущественно в Сосновском участковом лесничестве. Площадь поражения большим черным еловым усачом достигает 2,1 % от общей площади и фиксируется в Тубинском участковом лесничестве, Кедровской даче. В Тубинском участковом лесничестве выявлены очаги заражения инвазивным, очень агрессивным видом — уссурийским полиграфом, поражающим пихтовые деревья на площади 0,8 %. Поэтому следует уделить особое внимание профилактическим методам борьбы с данным вредителем.

Учитывая, что лесничества Усть-Илимского района являются поставщиками сырья для Усть-Илимского лесопромышленного комплекса, а также экспортерами деловой древесины, то установление столь значительных карантинных зон и запретов на вывоз древесины наносит существенный ущерб бюджету Иркутской области. Наибольшим спросом в экспорте древесины пользуется сосна, ее доля в экспорте Иркутской области составляет в среднем 75 %, а также пихта сибирская — 7 %. В связи с этим необходимо организовать мониторинг пихтарников трех типов: оперативный — за появлением усыхающих пихтовых деревьев при обходах лесничими; режимный — на стационарных площадках в поврежденных лесах и локальный — в зонах наибольшего усыхания. При обнаружении 10 % деревьев IV категории следует проводить санитарные рубки для приостановления очага массового размножения вредителя, а V, VI категории — с противопожарной целью.

Для борьбы с постоянно присутствующим в хвойных лесах сибирским шелкопрядом рекомендуем проводить обработку биологическим препаратом «Лепидоцида®» на основе штамма Bacillus thuringiensis var.kurstaki. Препарат содержит споры и клетки культуры-продуцента Bacillus thuringiensis var. kurstaki; дельта-эндотоксин в форме белковых кристаллов; инертные наполнители, обеспечивающие сохранность и стабильность препарата. Препарат безопасен для человека и теплокровных животных, гибель вредоносных насекомых наступает только после его попадания в кишечник насекомого. Норма применения препарата «Лепидоцида®» — 3 л/га. Препарат может быть использован в виде суспензии при авиационной обработке лесов путем малообъемного и ультрамалообъемного опрыскивания или аэрозольного распыления с помощью генераторов регулируемой дисперсности.

Имеющийся в Иркутской области опыт борьбы с сибирским шелкопрядом в 2016–2017 годах с применением новых инсектицидов «Клонрин КЭ» и «Клипер КЭ» показал, что обработка на складах заготовленной для экспорта древесины хотя и обеспечивает ее сохранность, но приводит к непредсказуемым экологическим последствиям.

Учитывая печальный опыт широкого и необдуманного применения в 60–70 годы XX века дуста ДДД — 1,1,1-трихлор-2,2-бис (4-хлорфенил) этана — стойкого органического пестицида, сохраняющегося до сих пор в биоте, накапливающегося в трофических цепях, обнаруживаемого в Антарктиде в жировых тканях пингвинов, следует воздержаться от применения «Клонрина КЭ», несмотря на рекомендации соответствующих служб[16].

С профилактическими целями целесообразно установить феромонные ловушки для выявления вредителей. Ловушки необходимо размещать на высоте 1,5–2 метра от земли в начале лета и периодически проверять.

Современное состояние распространения карантинных насекомых-вредителей в лесах Иркутской области можно рассматривать как неблагоприятное, требующее соблюдения профилактических мер и проведения мер реагирования при возникновении вспышек численности и появлении новых очагов. Наиболее экологически целесообразным вариантом управления фитосанитарными рисками являются санитарные рубки со своевременной уборкой ветровала и поврежденных пожаром деревьев, установка феромонных ловушек, обработка биопрепаратами.

Список литературы / References

1. Лямцев Н.И., Комарова И.А. Угрозы санитарной безопасности в лесах и опыт их оценки. *Лесохозяйственная информация*. 2021;(4):83–96. https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.4.06

Lyamtsev NI, Komarova IA. Threats to Sanitary Safety in Forests and the Experience of their Assessment. *Forestry Information*. 2021;(4):83–96. https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.4.06 (In Russ.).

2. Тимофеева С.С, Гармышев В.В. Экологические последствия лесных пожаров на территории Иркутской области. *Экология и промышленность России*. 2017;21(3):46–49. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-46-49

Timofeeva SS, Garmyshev VV. Environmental Impacts of Forest Fires on the Territory of Irkutsk Oblast. *Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(3):46–49. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-46-49 (In Russ.).

3. Тимофеева С.С., Гармышев В.В., Астраханцева А.Ю. Сравнительный анализ экологических рисков природных пожаров на территории Байкальского региона. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;(4):22–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-22-29

Timofeeva SS, Garmyshev VV, Astrakhantseva AYu. Comparative Analysis of Environmental Risks of Wildfires in the Baikal Region. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;(4):22–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-22-29

4. Тимофеева С.С., Морозова О.В. Заторные наводнения в Иркутской области и возможности их ликвидации комбинированными методами. *Безопасность в техносфере*. 2015;4(1):38–44. https://doi.org/10.12737/8228

Timofeeva SS, Morozova OV. Ice-Jam Floods in the Irkutsk Region and Possibility of Their Elimination by Combined Methods. *Safety in the Technosphere*. 2015;4(1):38–44. https://doi.org/10.12737/8228 (In Russ.).

5. Кобзарь В.Ф., Колесова Н.И., Петрик А.А. Карантинные и другие вредители, выявленные в лесах Иркутской области. *Фитосанитария. Карантин растений.* 2021;(4):37–48. URL: https://phytosanitary.vniikr.ru/jour/article/view/91/175 (дата обращения: 08.02.2024).

Kobzar VF, Kolesova NI, Petrik AA. Quarantine and Other Pests Detected in the Forests of Irkutsk Oblast. *Plant Health and Quarantine*. 2021;(4):37–48. URL: https://phytosanitary.vniikr.ru/jour/article/view/91/175 (accessed: 08.02.2024).

6. Чжан С.А., Пузанова О.А., Евдокимов Р.Н. Фитосанитарное состояние лесов Иркутской области. *Успехи современного естествознания*. 2022;(2):34–39. https://doi.org/10.17513/use.37775

Chzhan SA, Puzanova OA, Evdokimov RN. Phytosanitary Condition of Forests of Irkutsk Region. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022;(2):34–39. https://doi.org/10.17513/use.37775 (In Russ.).

7. Юрьева М.М. Понятие и сущность государственного фитосанитарного и ветеринарного контроля в Российской Федерации. *Вестник магистратуры*. 2019;(3–1(90)):60–63. URL: https://magisterjournal.ru/docs/VM90_1.pdf?ysclid=luqju8nksv931908745 (дата обращения: 08.02.2024).

Yur'eva MM. The Concept and Essence of State Phytosanitary and Veterinary Control in the Russian Federation. *Vestnik magistratury*. 2019;(3–1(90)).60–63. URL: https://magisterjournal.ru/docs/VM90_1.pdf?ysclid=luqju8nksv931908745 (accessed: 08.02.2024). (In Russ.).

[16] *Рекомендации по применению клонрина для защиты леса от хвое- и листогрызущих вредителей и клипера для защиты штабелеванной древесины*. Пушкино : ВНИИЛМ, 2022. 24 с. URL: https://vniilm.ru/media/edition2022/Klonrin.pdf (дата обращения: 08.02.2024).

8. Хачатурян А.Л. Состояние и перспективы развития карантинного фитосанитарного контроля в сфере внешней торговли товарами. *Международный научный студенческий журнал*. 2021;(12):431–435.

Khachaturyan AL. State and Prospects for the Development of Quarantine Phytosanitary Control in the Field of Foreign Trade in Goods. *Mezhdunarodnyi Nauchnyi Studencheskii Zhurnal*. 2021;(12):431–435. (In Russ.).

9. Арсенова А.А., Чаплыгина М.А., Чмелев В.В. Карантинный фитосанитарный контроль как одна из форм государственного контроля.. Болычева Е.А (ред.) В: *Труды 11-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития социально-экономических систем: теория и практика, Курск, 28 мая 2021 года».* Курск: Юго-Западный государственный университет; 2021. С. 20–25.

Arsenova AA, Chaplygina MA, Chmelev VV. Quarantine Phytosanitary Control as One of the Forms of State Control. EA Bolycheva (ed.) In: *Collection of Scientific Articles of the 11th International Scientific and Practical Conference "Current Problems of the Development of Socio-Economic Systems: Theory and Practice, Kursk, May 28, 2021*". Kursk: Southwestern State University; 2021. P. 20–25. (In Russ.).

10. Хомич К.А. Проблема соотношения национальных и наднациональных форм документов и их использование при таможенном контроле в ЕАЭС. *Молодой ученый*. 2019;(10–1(114)):62–64. URL: https://moluch.ru/archive/114/29421/?ysclid=luqk6xwmc8455100380 (дата обращения: 08.02.2024).

Khomich KA. The Problem of the Ratio of National and Supranational Forms of Documents and Their Use in Customs Control in the EAEU. *Molodoi uchenyi.* 2019;(10–1(114)):62–64. URL: https://moluch.ru/archive/114/29421/?ysclid=luqk6xwmc8455100380 (accessed: 08.02.2024). (In Russ.).

11. Кармазин С.А. Практика анализа фитосанитарного риска и оценки серьезных последствий окружающей среды в РФ. *Защита и карантин растений*. 2013;(10):31–33. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/praktika-analiza-fitosanitarnogo-riska-i-otsenki-potentsialnogo-ekonomicheskogo-uscherba-okruzhayuschey-srede-v-rf (дата обращения: 08.02.2024).

Karmazin SA. Practice of Phytosanitary Risk Analysis and Assessment of Serious Environmental Consequences in the Russian Federation. *Zashchita i Karantin Rastenii*. 2013;(10):31–33. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/praktika-analiza-fitosanitarnogo-riska-i-otsenki-potentsialnogo-ekonomicheskogo-uscherba-okruzhayuschey-srede-v-rf (accessed: 08.02.2024). (In Russ.).

12. Кархова С.А. Исследование структуры экспорта лесной продукции из Иркутской области. *Фундаментальные исследования*. 2018;(6):127–132. https://doi.org/10.17513/fr.42179

Karkhova SA. Investigation of the Forest Products Export Structure from the Irkutsk Region. *Fundamental Research*. 2018;(6):127–132. https://doi.org/10.17513/fr.42179 (In Russ.).

Об авторах:

Светлана Семеновна Тимофеева, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), SPIN-код: 8427-9622, ORCID, ScopusID, sstimofeeva@mail.ru

Семен Вячеславович Тенчиков, магистрант кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Иркутского национального исследовательского технического университета, государственный инспектор отдела фитосанитарного контроля по Иркутской области Управления Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору по Иркутской области и Республике Бурятия (Россельхознадзор по Иркутской области) (664023, г. Иркутск, ул. Красноярская, 77).

Семен Сергеевич Тимофеев, старший преподаватель кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), SPIN-код: 2694-7070, sstimofeeva@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

С.С. Тимофеева — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, написание текста, корректировка выводов, научное руководство.

С.В. Тенчиков — проведение расчетов, анализ результатов исследований, формирование выводов.

С.С. Тимофеев — проведение расчетов потенциального ущерба экономике региона.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 26.02.2024
Поступила после рецензирования 22.03.2024
Принята к публикации 29.03.2024

About the Authors:

Svetlana S. Timofeeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Industrial Ecology and Life Safety Department, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, RF), SPIN-code: 8427-9622, ORCID, ScopusID, sstimofeeva@mail.ru

Semen V. Tenchikov, Graduate student of the Industrial Ecology and Life Safety Department, Irkutsk National Research Technical University, State Inspector of the Department of Phytosanitary Control in the Irkutsk Region of the Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Supervision in the Irkutsk Region and the Republic of Buryatia (Rosselkhoznadzor for the Irkutsk Region) (77, Krasnoyarsk Str., Irkutsk, 664023, RF).

Semen S. Timofeev, Senior Lecturer of the Industrial Ecology and Life Safety Department, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, RF), SPIN-code: 2694-7070, sstimofeeva@mail.ru

Claimed Contributorship:

SS Timofeeva: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, writing the text, correction of the conclusions, academic advising.

SV Tenchikov: calculations, analysis of the research results, formulation of the conclusions.

SS Timofeev: calculations of potential damage to the economy of the region.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final version of the manuscript.

Received 26.02.2024
Revised 22.03.2024
Accepted 29.03.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING

Check for updates

УДК 621.86/.87: 004.032.26
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-57-67

Научная статья

Использование искусственного интеллекта для контроля надежности съемных грузозахватных приспособлений

В.В. Егельский, Н.Н. Николаев, Е.В. Егельская ✉, А.А. Короткий
Донской государственный технический университет, Российская Федерация
✉ egelskaya72@mail.ru

EDN: WVVMDV

Аннотация

Введение. Неисправность съемных грузозахватных приспособлений (СГП) создает значимые производственные риски. Этим обусловлена актуальность исследований в данном направлении. Проблема часто становится темой научных изысканий. Авторы предлагают шире использовать искусственный интеллект для мониторинга состояния СГП. В представленной работе показано, как усовершенствовать модель машинного зрения для лучшего выявления отсутствия замков на крюках СГП. Отмечена вероятность широкого распространения проблемы в производственной практике. Предложена схема стенда хранения и контроля состояния СГП. Цель исследования — продемонстрировать возможности дообучения нейросети для существенного повышения эффективности контроля СГП, обеспечивающего безопасность их применения.

Материалы и методы. Работа базируется на актах обследования 144 СГП на заводе ООО «КЗ «Ростсельмаш»» в 2022–2023 гг. Материалы обрабатывались методами математической статистики. Исследовалась нейросетевая модель, предварительно обученная по алгоритму компьютерного зрения YOLO. Ее дообучили с учетом норм браковки СГП, зафиксированных в федеральных правилах и стандартах. Из этих источников взяли изображения СГП с дефектами и отсутствующими элементами и сформировали базу для дообучения сети. Базу расширили методом аугментации. Для работы использовали платформу Roboflow.

Результаты исследования. Массив изображений для дообучения нейросети разделили на три выборки: обучающую (88 %), проверочную (8 %) и тестовую (4 %). По ним проводили обучение и верифицировали его результаты. Обучение завершилось за 260 эпох при стабильном увеличении точности работы. Полученная таким образом нейросетевая модель компьютерного зрения автоматически обнаруживает часто встречающийся дефект крюка СГП — отсутствие замка. Качество ее работы оценили по трем показателям: средняя точность (94 %), точность предсказания (88,8 %) и отклик (89,2 %). Нейросеть может в режиме реального времени получать изображение с видеокамеры и распознавать дефект крюка. При обследовании СГП на заводе «Ростсельмаш» обнаружили эксплуатируемый захват для подъема двигателей, у которого все три крюка оказались дефектными — без замков. Для исключения таких ситуаций по окончании работы целесообразно размещать СГП на специальном стенде с микроконтроллерным устройством, которое отследит наличие ряда проблем с помощью радиочастотной идентификации.

Обсуждение и заключение. Основное предназначение описанного решения — выявление и фиксация признаков несоответствия СГП требуемым нормативам. Задача может быть реализована на объектах, эксплуатирующих подъемные сооружения. В этом случае своевременно замеченные изъяны СГП позволят предупреждать производственные инциденты. В итоге можно рассчитывать на снижение материального ущерба и улучшение статистики по травматизму.

Ключевые слова: контроль состояния съемных грузозахватных приспособлений, браковка грузозахватных приспособлений, дефекты крюков для грузовых работ

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам — специалистам кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ДГТУ за помощь при подготовке материалов исследования.

Для цитирования. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Короткий А.А. Использование искусственного интеллекта для контроля надежности съемных грузозахватных приспособлений. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):57–67. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-57-67

Research Article

Use of Artificial Intelligence to Monitor the Reliability of Removable Load-Handling Devices

Vladislav V. Egelsky, **Nikolay N. Nikolaev**, **Elena V. Egelskaya** ✉, **Anatoly A. Korotkiy**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ egelskaya72@mail.ru

Abstract
Introduction. The malfunction of removable load-handling devices (RLHD) poses significant production risks. That is why research in this field is relevant. The problem has often become a topic of scientific investigation. The authors propose using artificial intelligence more extensively to monitor the state of RLHD. This paper presents a study on how to improve the machine vision model to better identify the absence of locks on RLHD hooks. A probable occurrence of such an issue in production is noted. A storage and monitoring system for RLHD condition is proposed. The aim of this study is to demonstrate the potential for further training of neural networks to significantly enhance the efficiency of RLHD monitoring, ensuring their safe use.
Materials and Methods. The work is based on the results of a survey conducted at the LLC "KZ Rostselmash" plant from 2022 to 2023, involving 144 RLHD. Mathematical statistics methods were used to process the data. A neural network model previously trained using the YOLO computer vision algorithm was studied. It was retrained taking into account the norms of the rejection of RLHD, specified in federal rules and standards. Images of RLHD with defects and missing parts were collected from these sources and used to create a training database. The database was expanded by augmentation. The Roboflow platform was used for work.
Results. The array of images used for further training of the neural network was divided into three samples: training (88%), validation (8%) and test (4%). These samples were used to train and validate its results. The training was completed after 260 epochs, with a steady increase in accuracy. The neural network model of computer vision obtained in this way automatically detected a common defect in the RLHD hook — the absence of a lock. Its performance was assessed using three indicators: average accuracy (94%), prediction accuracy (88.8%) and response (89.2%). The neural network could receive images from a video camera in real-time and recognize hook defects. During the RLHD inspection at the Rostselmash plant, a grab for lifting engines was found to have all three hooks defective — without locks. To avoid such situations, at the end of work, it was recommended to place the RLHD on a special stand equipped with a microcontroller device that could monitor for a number of potential issues using radio frequency identification.
Discussion and Conclusions. The main goal of this proposed solution is to detect and address signs of non-compliance with the established standards. This task can be implemented in facilities that use lifting equipment. In this case, the timely noticed RLHD defects will allow preventing production incidents. As a result, material damage can be reduced and injury statistics improved.

Keywords: monitoring the condition of removable load-handling devices, rejection of load-handling devices, defects of hooks for cargo work

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the colleagues — specialists from the Operation of Transport Systems and Logistics Department at Don State Technical University — for their assistance in preparing the research materials.

For Citation. Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Use of Artificial Intelligence to Monitor the Reliability of Removable Load-Handling Devices. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):57–67. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-57-67

Введение. Площадки, на которых эксплуатируются грузоподъемные краны и краны-манипуляторы, относятся к опасным производственным объектам (ОПО)[1] и должны отвечать определенным требованиям безопасности. Это касается и работоспособности комплекса оборудования и его элементов, в частности

[1] *О промышленной безопасности опасных производственных объектов.* Федеральный закон №116-ФЗ от 21.07.1997. Консультант Плюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (дата обращения: 18.03.2024).

съемных грузозахватных приспособлений (СГП). Исправность системы в определенной степени зависит от человеческого фактора [1], и связанные с этим риски можно снизить благодаря автоматизации и цифровизации.

Деятельность ОПО находится под надзором Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). При этом объекты эксплуатации подъемных сооружений освобождены от плановых проверок[2], а состояние оборудования контролируют соответствующие службы эксплуатирующих предприятий [2].

Ростехнадзор ежегодно публикует статистику аварий и несчастных случаев, а также выводы по результатам их расследований[3]. Эти материалы позволяют назвать основные причины инцидентов, в частности связанные с контролем состояния съемных грузозахватных приспособлений:

– отсутствие назначенных специалистов, ответственных за безопасную работу подъемных сооружений;

– допуск к работе персонала без соответствующей квалификации;

– отсутствие на объекте должностных и производственных инструкций;

– несвоевременное проведение плановых осмотров, ремонтов и технических освидетельствований подъемных сооружений и оборудования, работающего совместно с ними.

Стропальщики используют съемные приспособления для подвешивания грузов к крюку грузоподъемного крана или крана-манипулятора. От правильности выполнения этих операций зависит безаварийная работа на объекте.

Подъемные сооружения должны работать только при наличии проектов производства работ или технологических карт, обязательный элемент которых — схема строповки грузов[4]. До начала работ с технологическими картами под роспись знакомятся стропальщики, крановщики и специалисты, ответственные за безопасное производство работ. Схемы строповки вывешиваются в местах производства работ.

Второй важный фактор безопасности — исправное состояние используемых СГП. Неисправность СГП — частая причина падения с высоты грузов, самих грузозахватных приспособлений или их элементов. Кроме того, возможна потеря устойчивости подъемного сооружения. Все это может быть фактором материальных потерь и травм персонала.

В нормативно-правовых актах и должностных инструкциях зафиксировано требование постоянного мониторинга состояния СГП. Как сказано в этих документах:

– ежесменный контроль состояния СГП возложен на стропальщика, для чего ему выделяется время перед началом работ;[5]

– специалист, ответственный за безопасное производство работ подъемными сооружениями, не реже одного раза в 10 дней контролирует состояние стропов, не реже одного раза в месяц — захватов и траверс.

Результаты проверок заносятся в журнал учета и периодических осмотров съемных грузозахватных приспособлений и тары.

Выполнение этих предписаний должно исключить возможность использования неисправных, подлежащих браковке СГП.

Из статистики и литературы [2] известно, что аварийность на ОПО зависит от квалификации руководителей и ответственных специалистов. Персонал с несформированными компетенциями [3] может пренебрежительно относиться к контролю, пропускать некоторые этапы, нарушать правила осмотров СГП и документального оформления их результатов.

Корректное использование искусственного интеллекта существенно повышает эффективность контроля СГП.

В данной статье рассматривается потенциал дообучения нейронных сетей [4] для повышения качества контроля исправного состояния СГП. Предлагается внедрить нейросетевые технологии компьютерного зрения [5] для контроля исправности крюков съемных грузозахватных приспособлений.

Такой подход соответствует Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года[6].

---

[2] *О промышленной безопасности опасных производственных объектов.* Федеральный закон №116-ФЗ от 21.07.1997. Консультант Плюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (дата обращения: 18.03.2024).

[3] *Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2022 году*. Ростехнадзор. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (дата обращения: 10.03.2024).

[4] *Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения».* Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461. Гарант. URL: https://base.garant.ru/400165076/ (дата обращения: 10.03.2024).

[5] *Типовая инструкция для стропальщиков по безопасному производству работ грузоподъемными машинами. РД 10-107-96.* № 3 от 08.02.1996. Гарант. URL: https://base.garant.ru/3924623/ (дата обращения: 10.03.2024).

[6] *Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года*. Указ Президента РФ N 490 от 10.10.2019. Консультант Плюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/ (дата обращения: 10.03.2024).

Цель исследования — представить возможности дообучения нейросети для расширения возможности машинного зрения в определении пригодности СГП. Практическая реализация представленного решения должна повысить эффективность контроля состояния СГП и, следовательно, безопасность их применения.

Материалы и методы. Стропы предназначены для зацепки, обвязки и удерживания груза на крюке подъемного сооружения [6]. Используются разные методы их браковки. Это обусловлено различиями конструкций стропов и материалов, из которых они изготовлены. Нормы браковки определены в соответствующих документах, методики проведения испытаний описаны в госстандартах[7].

Каждый строп должен иметь маркировочную бирку с указанием завода-изготовителя, заводского номера, грузоподъемности и даты испытания. Отсутствие бирки недопустимо и является показанием к браковке. Важный элемент СГП и стропов — крюк с обязательным замыкающим устройством (замок крюка) [7].

При подготовке данной статьи методами математической статистики проанализировали результаты массового обследования СГП на заводе ООО «КЗ «Ростсельмаш»» в 2022–2023 гг., которое проводили специалисты инженерно-консультационного центра «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета. Результаты оформили в виде актов — обязательных приложений к паспортам каждого СГП. Эти документы были исходными материалами представленной научной работы (рис. 1, 2).

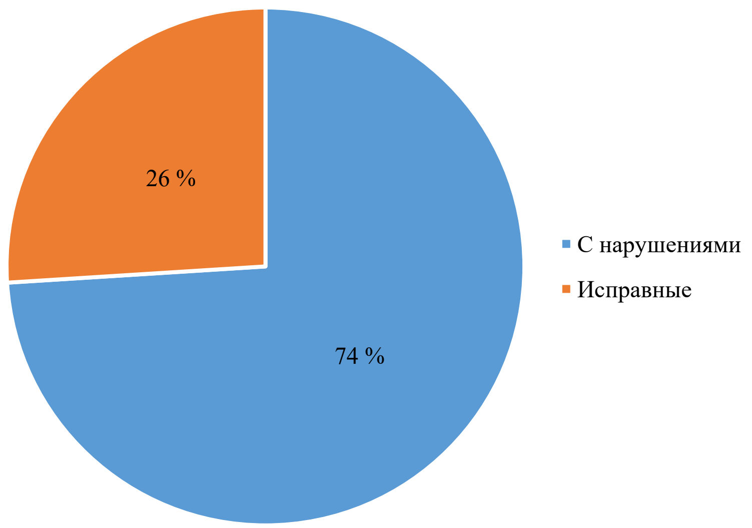


Рис. 1. Соотношение пригодных и непригодных СГП

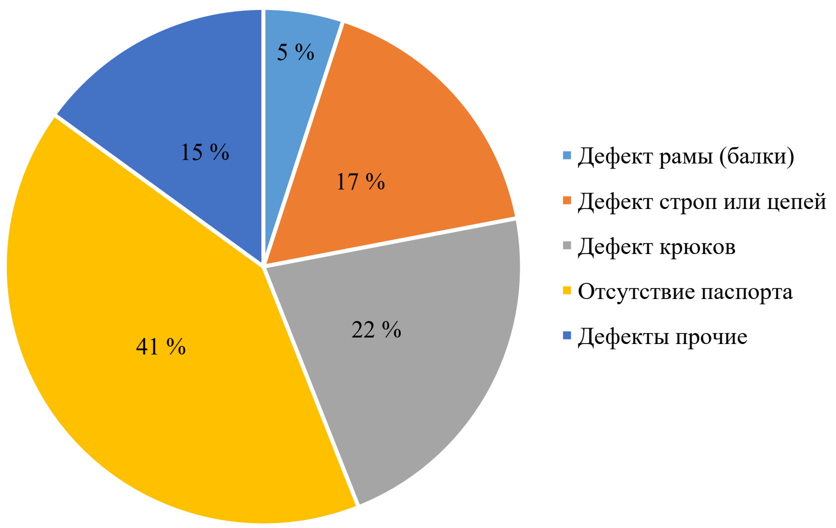


Рис. 2. Доли СГП с несоответствиями и дефектами

[7] ГОСТ 33715–2015 *Краны грузоподъемные. Съемные грузозахватные приспособления и тара. Эксплуатация.* Гарант. URL: https://base.garant.ru/71684432/ (дата обращения: 10.03.2024).

Согласно данным обследования 144 СГП, три четверти приспособлений не соответствуют требованиям нормативной документации[6] (рис. 1).

Анализ распределения дефектов и несоответствий нормативной документации показал, что чаще всего встречается отсутствие паспорта СГП (более 40 % случаев). Самый распространенных технический изъян — это дефект крюков (22 % случаев). На дефекты цепей и строп приходится 17 % зафиксированных случаев, на прочие дефекты — 15 %. Конструкционно обусловленные изъяны составили 5 %. Это изъяны специальных захватов, фиксаторов, зажимов, рам, балок и траверс.

Исследование целесообразно начинать с вопросов контроля состояния крюков. Почти в 100 % случаев их дефекты — это отсутствие или поломка фиксатора стропы (замка).

В [8] показаны возможности интегральной оценки риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения. Этот подход стал базовым при разработке методов оперативного выявления несоответствий и неисправностей СГП. Несоответствующие требованиям приспособления не должны допускаться к работе. Для этого следует усилить технический контроль цифровой системой мониторинга с компьютерным зрением, которое может автоматически идентифицировать зрительно определяемые неисправности.

По итогам сравнительного анализа выбрали один из алгоритмов компьютерного зрения — предобученную нейронную сеть открытого доступа YOLOv8[8]. Это новейшая версия известной модели обнаружения объектов и сегментации изображений в реальном времени. Она построена на передовых достижениях в области глубокого обучения и компьютерного зрения, обладает высокой производительностью по скорости и точности. Благодаря особенностям дизайна подходит для различных приложений и легко адаптируется к разным аппаратным платформам. YOLOv8 идентифицирует многие объекты реального мира: людей, автомобили, компьютеры, предметы мебели и т. п. Однако для обнаружения неисправностей СГП YOLOv8 нужно дополнительное обучение [9]. Его выполнили с помощью открытого онлайн-сервиса Roboflow[9], который предоставляет пользователю инструментарий для создания базы аннотированных изображений, необходимых при обучении модели YOLOv8. Сервис позволяет загружать и аннотировать изображения по заданным классам, относить их к обучающей (train), проверочной (validation) и тестовой (test) выборкам [10].

Результаты исследования. Для дообучения сети использовали неаннотированные изображения крюков разных типов, размеров и форм с фиксатором (замком) и без него (рис. 3). Их собрали из разных источников (в том числе при обследовании СГП).

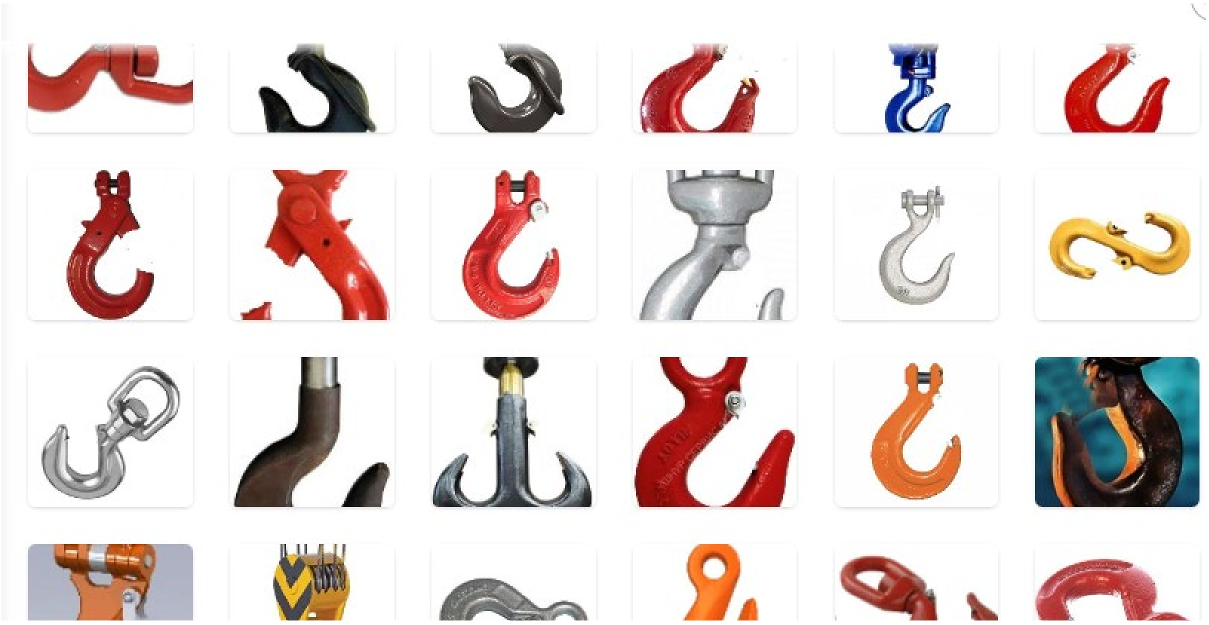


Рис. 3. Изображения крюков без замков, загруженные в сервис Roboflow

Разнообразие изображений крюков повышает качество обучения и последующего распознания, существенно сокращает число ошибок дообученной модели [11].

---

[8] *Introducing Ultralytics YOLOv8.* Ultralytics. URL: https://docs.ultralytics.com/ (дата обращения: 10.03.2024).
[9] *Everything you Need to Build and Deploy Computer Vision Models.* Roboflow. URL: https://roboflow.com/ (дата обращения: 10.03.2024).

На следующем этапе контуры объектов распознания выделили с помощью инструмента «умный полигон» и аннотировали по классам hookWithLock (для крюков с замком) и noLock (для крюков без замка) (рис. 4).

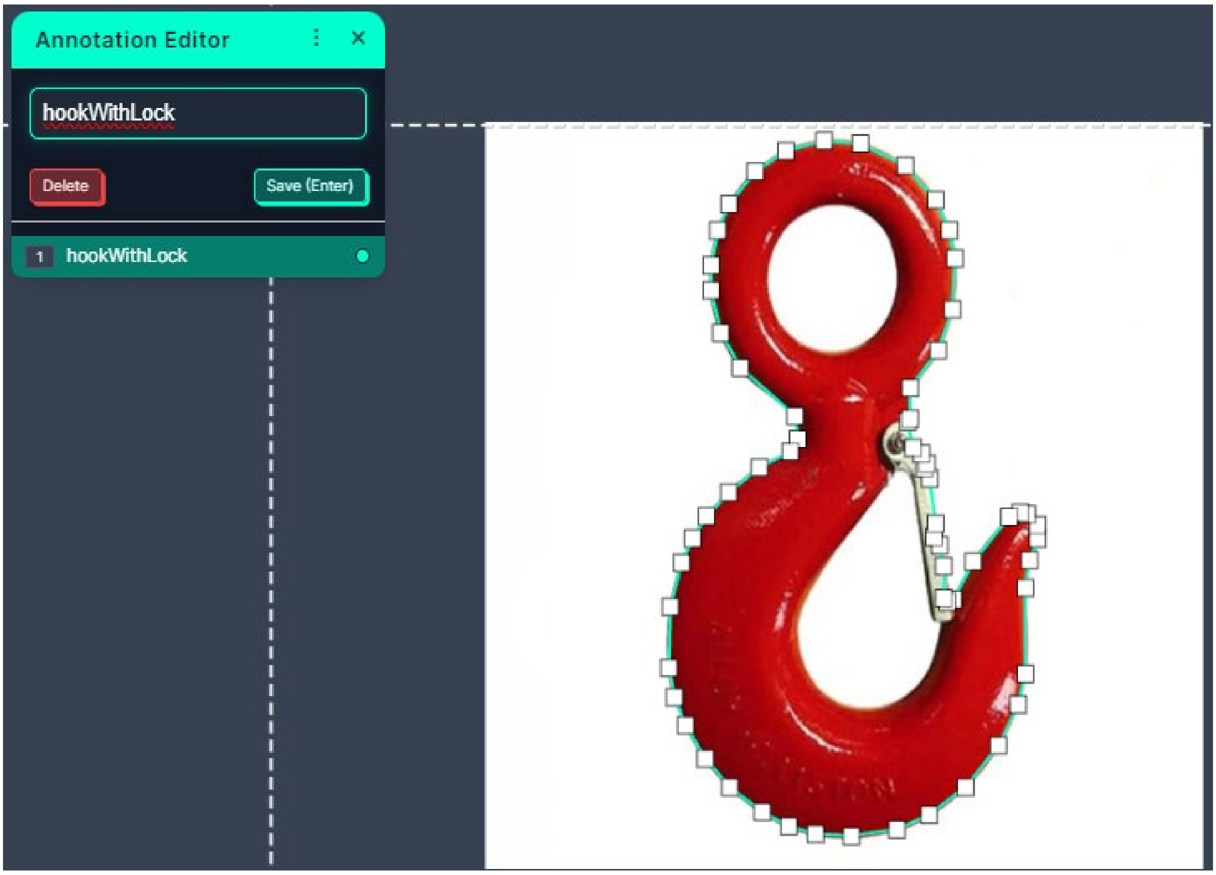


Рис. 4. Аннотирование изображения

Следующий этап методики дополнительного обучения нейронной сети в Roboflow — аугментация, т.е. увеличение объема выборки путем преобразования изображений. Для этого используются перспектива, шумы, повороты и др. В результате получили 401 аннотированное изображение (рис. 5).

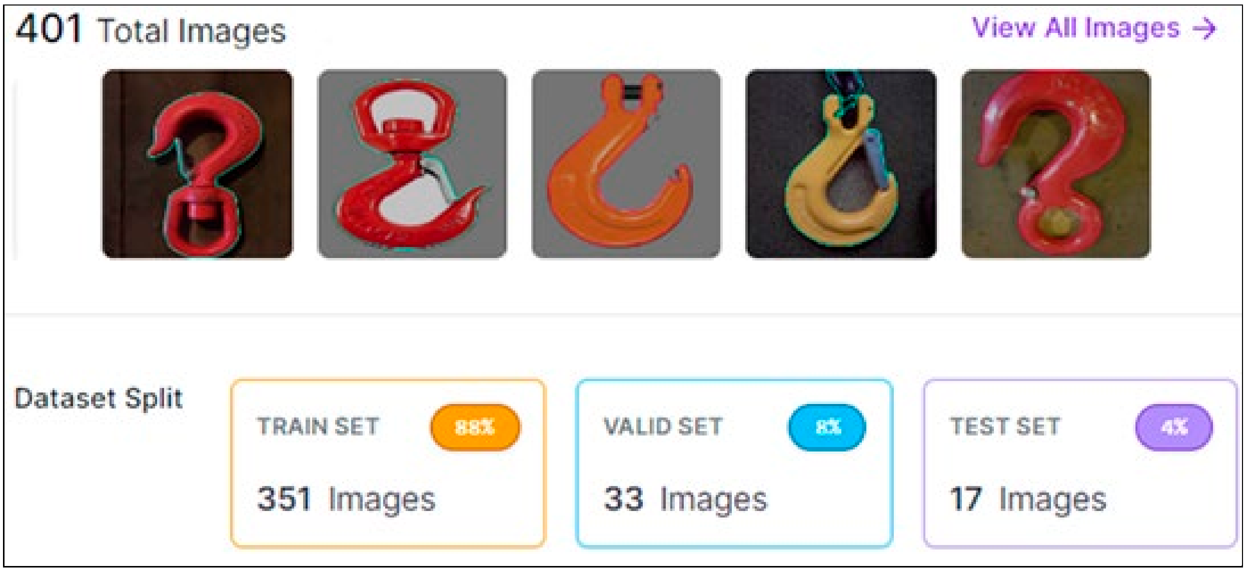


Рис. 5. Результат аннотирования и аугментации

Полученный массив изображений разделили на обучающую (train set), проверочную (valid set) и тестовую (test set) выборки в соотношении 88 %, 8 % и 4 % соответственно. Выборки используются для обучения сети и верификации результатов обучения [12].

Сеть обучалась и сверяла результаты с проверочной выборкой. При этом точность ее работы стабильно росла, а обучение завершилось за 260 эпох (рис. 6).

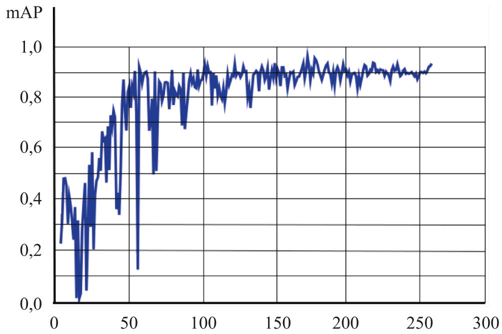


Рис. 6. Изменение точности работы нейросети компьютерного зрения в процессе обучения

В итоге получили нейросетевую модель компьютерного зрения, которая автоматически обнаруживает часто встречающийся дефект крюка СГП — отсутствие замка. Качество ее работы оценивается тремя описанными ниже показателями (рис. 7).



Рис. 7. Показатели качества обученности полученной нейронной сети

1. Значение средней точности (mAP), равное среднему значению показателя средней точности по всем классам в модели. В данном случае — 94 %.

2. Точность предсказания (precision) — показывает, как часто прогнозы модели оказываются верными. Зафиксированный уровень — 88,8 %.

3. Отклик (recall) — процент успешно идентифицированных меток. Показатель — 89,2 %.

Такая нейронная сеть может получать изображение в режиме реального времени с любой видеокамеры и распознавать дефект крюка (рис. 8).



а) *б)*

Рис. 8. Работа дообученной нейронной сети по обнаружению крюков: *а* — с замком; *б* — без замка

Данная нейросеть легко внедряется в программный код на любом языке программирования. Это дает возможность создать программный продукт автоматизированной оценки наличия дефектов СГП и внедрить его в производственную цифровую систему мониторинга состояния СГП [13].

В ходе обследования СГП на заводе ООО «КЗ «Ростсельмаш»» обнаружили захват ПМ-001501. Приспособление изготовлено производственной компанией «Подъем-мастер» и предназначено для подъема двигателей Ярославского моторного завода. Оно может служить примером эксплуатации неисправного СГП (рис. 9)



Рис. 9. Захват ПК ПМ-001501 без замков на крюках

Как видим, на всех трех крюках отсутствуют обязательные замки. Тем не менее приспособление эксплуатируется, что создает риски для жизни и здоровья персонала, а также ставит под угрозу целостность технических объектов. Логично предположить, что такие элементы есть в эксплуатации на многих предприятиях России. Для исключения подобных ситуаций авторы данной статьи предлагают по окончании работы размещать СГП на специальном стенде (рис. 10).

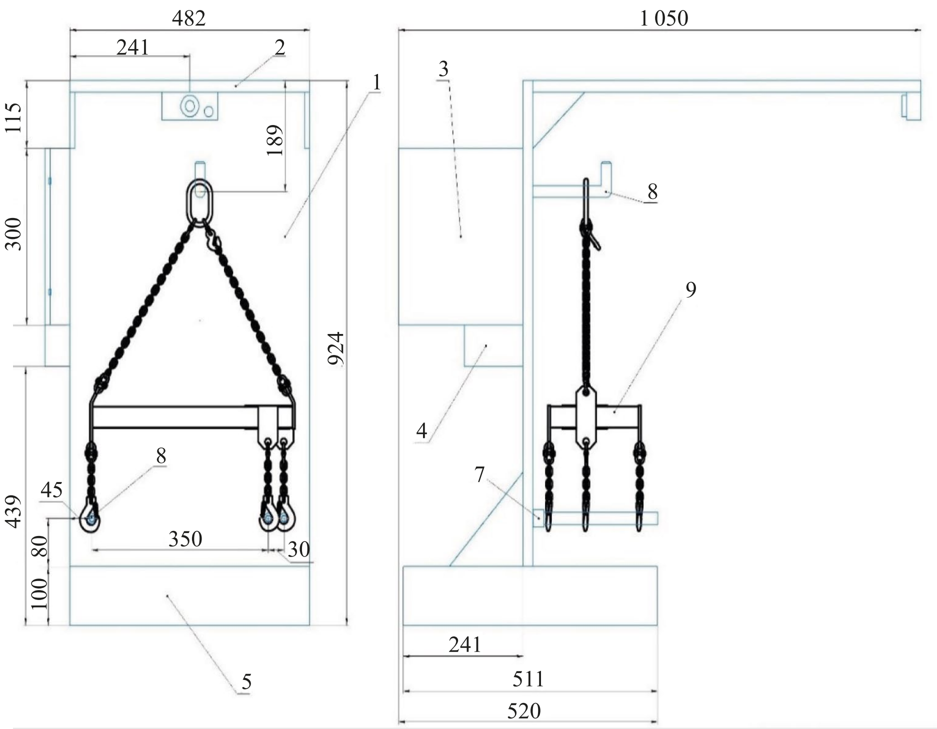


Рис. 10. Стенд хранения и контроля состояния СГП: 1 — стойка; 2 — кронштейн с камерой; 3 — ящик для паспорта СГП; 4 — электронный блок; 5 — основание; 6 — штырь крюка контактный; 7 — изолятор; 8 — подвес; 9 — съемное грузозахватное приспособление

Стенд снабжен микроконтроллерным устройством, которое отслеживает наличие паспорта СГП по RFID-метке (от англ. radio frequency identification — радиочастотная идентификация). Кроме того, с его помощью определяется правильность размещения крюков на стенде. Для этого используются тактильные пины контроллера ESP32. При правильном расположении крюков их состояние фиксируется камерой [14], установленной на кронштейне стенда. Полученное изображение интерпретируется обученной нейросетевой моделью компьютерного зрения и выдается предварительное заключение о наличии или отсутствии дефекта [15].

Обсуждение и заключение. Предложенное программное и аппаратное решение предназначено для автоматизированной оценки состояния СГП — элементов эксплуатируемых грузоподъемных кранов. Использование потенциала искусственного интеллекта повышает качество и оперативность мониторинга. В частности, позволяет своевременно выявлять отсутствие необходимых элементов и браковочных показателей СГП. Это открывает возможность существенного снижения аварийности. Адекватное внедрение предложенного подхода в производственную практику обеспечит также принятие обоснованных решений о продлении срока службы, допуске к дальнейшей эксплуатации или выбраковке СГП.

Список литературы / References

1. Егельская Е.В., Романенко М.Ю. Аспекты применения риск-ориентированного подхода на опасных производственных объектах. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2020;(4):45–49. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-45-49

Egelskaya EV, Romanenko MYu. Aspects of Application of a Risk-Based Approach to Hazardous Production Facilities. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2020;(4):45–49. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-45-49

2. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Короткий А.А. Влияние компетенций специалистов грузоподъемных кранов на вероятность возникновения аварийных ситуаций. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;(2):70–79. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79

Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Influence of the Competencies of Lifting Crane Specialists on the Probability of Emergencies. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(2):70–79. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79

3. Sanaz Sadeghi, Nazi Soltanmohammadlou, Payam Rahnamayiezekavat. A Systematic Review of Scholarly Works Addressing Crane Safety Requirements. *Safety Science.* 2021;133:105002. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105002

4. Числов О.Н., Лябах Н.Н. Нейросетевое исследование транспортных систем. *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник.* 2021;(10):9–13. https://doi.org/10.36535/0236-1914-2021-10-2

Chislov ON, Lyabakh NN, Kolesnikov MV, Bakalov MV, Zadorozhny VM. Neural Network Investigation of Transport Systems. *Transport: science, equipment, management (Scientific information collection).* 2021;(10):9–13. https://doi.org/10.36535/0236-1914-2021-10-2 (In Russ.).

5. Турлуев Р.Р. Нейросети в системах корпоративного управления. В: *Труды II Всероссийской научно-практической конференции «Цифровизация: Россия и СНГ в контексте глобальной трансформации».* Петрозаводск: Новая Наука; 2021. С. 7–16. https://doi.org/10.46916/12042021-2-978-5-00174-191-6

Turluyev RR. Neural Networks in Corporate Governance Systems. In: *Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference "Digitalization: Russia and the CIS in the context of global transformation".* Petrozavodsk: Novaya Nauka; 2021. P. 7–16. https://doi.org/10.46916/12042021-2-978-5-00174-191-6 (In Russ.).

6. Shuai Kang, Hongbing Wang. Crane Hook Detection Based on Mask R-CNN in Steel-making Plant. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1575:012151. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1575/1/012151

7. Weiguang Jiang, Lieyun Ding. Unsafe Hoisting Behavior Recognition for Tower Crane Based on Transfer Learning. *Automation in Construction*. 2024;160:105299. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105299

8. Панфилов А.В., Николаев Н.Н., Юсупов А.Р., Короткий А.А. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;(1):56–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69

Panfilov AV, Nikolaev NN, Yusupov AR, Korotkiy AA. Integral Risk Assessment in Steel Ropes Diagnostics Using Computer Vision. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(1):56–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69

9. Piskoty G, Affolter Ch, Sauder M, Nambiar M, Weisse B. Failure Analysis of a Ropeway Accident Focussing on the Wire Rope's Fracture Load under Lateral Pressure. *Engineering Failure Analysis*. 2017;82:648–656. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.003

10. Aimin Zhu, Zhiqian Zhang, Wei Pan. Technologies, Levels and Directions of Crane-Lift Automation in Construction. *Automation in Construction*. 2023;153:104960. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104960

11. Zhe Sun, Zhufu Zhu, Ruoxin Xiong, Pingbo Tang, Zhansheng Liu. Dynamic Human Systems Risk Prognosis and Control of Lifting Operations during Prefabricated Building Construction. *Developments in the Built Environment*. 2023;14:100143. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100143

12. Vahid Kargar, Mehdi Jahangiri, Moslem Alimohammadlu, Mojtaba Kamalinia, Marziyeh Mirazahossieninejad. Risk Assessment of Mobile Crane Overturning in Asymmetric Tandem Lifting (ATL) Operation Based on Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA). *Results in Engineering*. 2022;16:100755. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100755

13. Szpytko J, Duarte YS. Exploitation Efficiency System of Crane Based on Risk Managemen. In: *Proceedings of the International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics — IN4PL.* SciTePress; 2020. P. 24–31. https://doi.org/10.5220/0010123200240031

14. Stroganov YuN, Belov VV, Belova NN, Maksimov AN, Ognev OG. Analysis of Model for Assessing the Road Train Movement Stability. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;1889:042051 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1889/4/042051

15. Haoran Ding, Mingxing Li, Ray Y. Zhong, George Q. Huang, Multistage Self-Adaptive Decision-Making Mechanism for Prefabricated Building Modules with IoT-Enabled Graduation Manufacturing System. *Automation in Construction*. 2023;148:104755. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104755

Об авторах:

Владислав Витальевич Егельский, аспирант кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, sp_5sp_6pb_97n14@mail.ru

Николай Николаевич Николаев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8640-3508, ORCID, ResearcherID, ScopusID, nnneks@yandex.ru

Елена Владимировна Егельская, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 4663-9101, ORCID, egelskaya72@mail.ru

Анатолий Аркадьевич Короткий, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 1948-3628, ORCID, ScopusID, korot@novoch.ru

Заявленный вклад авторов:

В.В. Егельский — подготовка данных для обучения нейронной сети.

Н.Н. Николаев — разработка методики исследования, обучение нейронной сети.

Е.В. Егельская — оценка состояния вопроса и актуальности исследования, участие в формировании исходной концепции, оформление результатов исследования.

А.А. Короткий — обобщение результатов исследования, формулирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 22.03.2024
Поступила после рецензирования 05.04.2024
Принята к публикации 10.04.2024

About the Authors:

Vladislav V. Egelsky, Postgraduate Student of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, sp_5sp_6pb_97n14@mail.ru

Nikolay N. Nikolaev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 8640-3508, ORCID, ResearcherID, ScopusID, nnneks@yandex.ru

Elena V. Egelskaya, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 4663-9101, ORCID, egelskaya72@mail.ru

Anatoly A. Korotkiy, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 1948-3628, ORCID, ScopusID, korot@novoch.ru

Claimed Contributorship:

VV Egelsky: data preparation for neural network training.

NN Nikolaev: development of research methodology, neural network training.

EV Egelskaya: assessment of the state of the issue and the relevance of the research, participation in the formulation of the initial concept, design of the research results.

AA Korotkiy: generalization of the research results, formulation of the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final version of the manuscript.

Received 22.03.2024
Revised 05.04.2024
Accepted 10.04.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING

УДК 621.86/.87
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-68-77

Научная статья

EDN: BMJTNE

Сравнительный анализ качества работы искусственных нейронных сетей для оценки технического состояния стального каната

Р.В. Хван
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ khvanroman@yandex.ru

Аннотация
Введение. В настоящее время искусственные нейронные сети (ИНС) успешно применяются для технического диагностирования стальных канатов. Зачастую при этом используют дорогостоящие программные продукты с адаптированной средой реализации нейронных сетей, такие как STATISTICA, Amygdala, MATLAB Simulink. Наиболее доступным способом построения и обучения ИНС с финансовой точки зрения является написание собственного программного кода с использованием интерактивных библиотек, таких как TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn. Однако такие библиотеки не являются полноценными адаптированными средами построения ИНС, и для их использования необходимо владеть первичными навыками программирования. Поэтому качество ИНС зависит не только от архитектуры, объема и состава обучающих выборок, но и от метода (среды) построения ИНС. Целью данного исследования является сравнение качества работы ИНС, построенных и обученных различными методами, по критерию тестовой производительности сети, доверительным уровням оценки технического состояния каната, а также трудоемкости и скорости обучения. В связи с этим создано новое программное обеспечение для решения задачи оценки технического состояния стального каната по комбинации различных браковочных показателей.
Материалы и методы. Основой для обучения ИНС послужили статистическая база данных типовых повреждений стальных канатов, экспертная оценка их технического состояния. Программное обеспечение написано на языке программирования Python. Приведены различные методы программирования нейронной сети: ИНС, построенной на базе программного комплекса STATISTICA, и ИНС, построенной с использованием интерактивной библиотеки Scikit-learn. Для проверки работы ИНС было подготовлено 10 тестовых выборок. Оценка качества работы ИНС проводилась по тестовой производительности сети и доверительным вероятностям (уровням активации «победившего» нейрона) определения технического состояния каната.
Результаты исследования. Построение ИНС с использованием интерактивной библиотеки Scikit-learn показало сравнительно большую трудоемкость построения и сравнительно небольшую скорость обучения. Тестовая производительность сети при объеме тестовой выборки 10 оказалась одинаковой для обеих построенных ИНС. При этом обнаружилась разница в показателе среднего доверительного уровня определения технического состояния стального каната по результатам работы ИНС, построенной на базе программного комплекса STATISTICA, и ИНС, построенной с использованием интерактивной библиотеки Scikit-learn.
Обсуждение и заключение. Полученные результаты показали, что ИНС, построенная с использованием программного комплекса STATISTICA, при одинаковой архитектуре и параметрах обучения сети имеет более оптимальные программные алгоритмы по критериям доверительной вероятности и скорости обучения сети по сравнению с ИНС, построенной с использованием бесплатной библиотеки Skicit-learn. Однако показатель тестовой производительности ИНС оказался одинаковым для обеих ИНС. Такой результат обосновывает использование ведущими мировыми научно-исследовательскими и коммерческими центрами в области искусственного интеллекта библиотек TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn. Полученный научный результат позволит численно оценить и сравнить качество искусственных нейронных сетей, имеющих одинаковые

архитектуру и параметры обучения, но построенных различными методами, он будет полезным как для будущих научных исследований в этой области, так и для выбора оптимальной среды построения ИНС в промышленной сфере деятельности.

Ключевые слова: стальной канат, искусственные нейронные сети, оценка технического состояния, Python, Scikit-learn, STATISTICA, браковочные показатели

Благодарности. Автор выражает благодарность коллективу ООО «ИКЦ «Мысль» НГТУ г. Новочеркасска за предоставленную возможность использовать данные эксплуатации стальных канатов, а именно статистическую базу данных типовых повреждений стальных канатов.

Для цитирования. Хван Р.В. Сравнительный анализ качества работы искусственных нейронных сетей для оценки технического состояния стального каната. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(2):68–77. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-68-77

Research Article

Comparative Analysis of the Performance of Artificial Neural Networks in Assessing the Technical Condition of Steel Ropes

Roman V. Khvan

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ khvanroman@yandex.ru

Abstract

Introduction. Currently, artificial neural networks (ANN) are successfully used for technical diagnostics of steel ropes. Expensive software products with an adapted neural network implementation environment, such as STATISTICA, Amygdala, MatLab Simulink, are often used for this purpose. The most affordable way to build and train an ANN, from a financial point of view, is to write your own program code using interactive libraries such as TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn. However, such libraries are not fully adapted for building an ANN, and to use them you need to have basic programming skills. As a result, the quality of an ANN depends not only on its architecture, training data, and composition, but also on the environment in which it is built. The aim of the work was to compare the quality of the ANN, built and trained by various methods according to the criterion of test network performance, confidence levels for assessing the technical condition of the rope, as well as the complexity and speed of training. For this purpose, new software has been developed to solve the problem of assessing the technical condition of a steel rope using a combination of various rejection indicators.

Materials and Methods. The basis for an ANN training was a statistical database of typical damages of steel ropes and, an expert assessment of the technical condition of steel ropes. The software was written in the Python programming language. Various methods of programming a neural network were presented: an ANN built on the basis of the STATISTICA software package and an ANN built using the interactive Scikit-learn library. Ten test samples were prepared to verify the operation of the ANN. The ANN quality was assessed based on the test network performance and confidence probabilities (activation levels of the “winning” neuron) of determining the technical condition of the rope.

Results. The construction of the ANN using the interactive library Scikit-learn showed a relatively high complexity of construction and a relatively low learning rate of the ANN. Test performance of the network, with a test sample size of ten, turned out to be the same for both built ANNs. At the same time, there was a difference in the indicator of the average confidence level for determining the technical condition of a steel rope between the results of the ANN built on the basis of the STATISTICA software package and the ANN built using the Scikit-learn interactive library.

Discussion and Conclusion. The results showed that the ANN built using the STATISTICA software package with the same architecture and network learning parameters had more optimal software algorithms according to the criteria of confidence probability and network learning speed in comparison with the ANN built using the free Skicit-learn library. However, the indicator of the ANN test performance turned out to be the same for both ANNs. This result justified the use of TensorFlow, PyTorch, and Skicit-learn libraries by the world's leading research and commercial centers in the field of artificial intelligence. The obtained scientific result allows us to numerically evaluate and compare the quality of an ANN having the same architecture and learning parameters, but built using different methods. This will be useful for future scientific research in the field and for selecting the optimal environment for constructing ANNs in industrial applications.

Keywords: steel rope, artificial neural networks, technical condition assessment, Python, Skicit-learn, STATISTICA, rejection indicators

Acknowledgements. The author would like to expresses their gratitude to the team at the Engineering and Consulting Center "Mysl' LLC" of the Novocherkassk NSTU for the opportunity to use the data on the operation of steel ropes, specifically the statistical database on typical damages to steel ropes.

For Citation. Khvan RV. Comparative Analysis of the Performance of Artificial Neural Networks in Assessing the Technical Condition of Steel Ropes. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):68–77. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-68-77

Введение. В настоящее время методы оценки технического состояния объектов машиностроения с использованием ИНС получают все большее распространение. Это связанно прежде всего с относительной простотой выявления зависимостей выходных данных (в данном случае это техническое состояние стального каната) от входных данных (различные комбинации браковочных показателей стального каната). Так, для установления корреляционной зависимости технического состояния стального каната от различных комбинаций десяти браковочных показателей, выраженных в процентах от допустимой степени повреждения, требуются и большое количество аналитических операций, и решение многофакторной задачи регрессии. Программное обеспечение, ядром которого является нейронная сеть, облегчит работу и поможет экспертам и начинающим специалистам при принятии решения о возможности дальнейшей эксплуатации стального каната по различным комбинациям браковочных показателей.

Проблемами надежности и безопасности технических систем с применением современных средств искусственного интеллекта занимаются ученые различных отраслей знания. Примерами могут послужить работы В.А. Воронцова, Е.А. Федорова, А.А. Короткого, А.В. Панфилова, Н.Н. Николаева, А.Р. Юсупова, С.В. Жернакова, Т.И. Горевой, Н.Н. Портягина, Г.А. Пюкке, Б.Ч. Месхи, А.Н. Бескопыльного, С.А. Стельмах, И.Ф. Развеевой и др. [1–8]. В работах этих авторов успешно используются технологии нейросетевого моделирования для достижения различных научно-исследовательских и производственных целей, таких как оценка технического состояния авиационных двигателей, бортовых систем космического аппарата, обнаружение и классификация дефектов стального каната. При этом применяются различные архитектуры, параметры обучения ИНС, программные комплексы и среды разработки искусственной нейронной сети, такие как Alyuda NeuroIntelligence, STATISTICA, Amygdala, MatLab Simulink. Также широко практикуется написание собственного программного кода с использованием бесплатных (с открытым исходных кодом) интерактивных библиотек, таких как TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn. Однако стоит отметить отсутствие во всех указанных работах сравнения качества работы ИНС, имеющих одинаковую архитектуру, параметры обучения, объем и состав обучающих выборок, но построенных различными методами, т.е. в различных программных средах разработки.

Зачастую использование ИНС в промышленном масштабе связано с использованием дорогостоящих специализированных программных комплексов, обладающих адаптированной средой реализации нейронных сетей и не требующих от пользователя владения навыками программирования. Более доступным способом построения и обучения нейронной сети с финансовой точки зрения является написание собственного программного кода с использованием бесплатных интерактивных библиотек с открытым исходным кодом. Однако данный метод требует от пользователя владения первичными навыками программирования. Библиотека Scikit-learn имеет открытый исходный код, тогда как годовая лицензия программы STATISTICA составляет около 25 тысяч долларов США.

Цель данной работы — провести сравнительный анализ качества работы ИНС для оценки технического состояния стальных канатов по комбинации браковочных показателей, построенных и обученных различными методами, по критериям тестовой производительности сети, трудоемкости и скорости обучения сети, среднему уровню активации «победивших» нейронов сети и с учетом финансовых затрат на реализацию и использование построенных искусственных нейронных сетей. В связи с этим поставлена задача создать новое программное обеспечение для оценки технического состояния стальных канатов по комбинации браковочных показателей с применением ИНС двумя различными способами: ИНС, построенной на базе программного комплекса STATISTICA, и ИНС, построенной с использованием интерактивной библиотеки Scikit-learn.

Материалы и методы. Основой для обучения ИНС послужил опыт эксплуатации стальных канатов, а именно статистическая база данных типовых повреждений стальных канатов, экспертная оценка технического состояния стальных канатов [9–12]. На рис. 1 представлена схема нейронной сети для оценки технического состояния стального каната, используемая во всех ниже представленных методах.

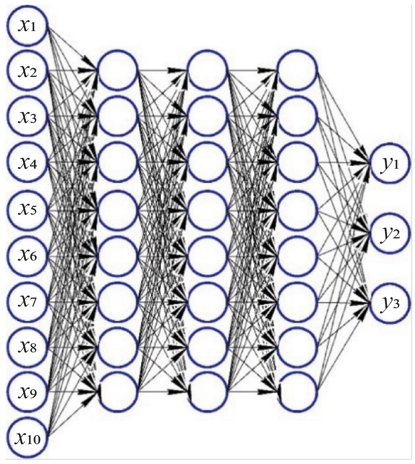


Рис. 1. Схема ИНС для оценки технического состояния стального каната

Ниже представлены параметры, используемые в обоих методах построения ИНС:

1. Заданы так называемые гиперпараметры — параметры, которые не изменяются в процессе обучения сети, это:

– 10 нейронов входного слоя, равные количеству браковочных показателей стального каната (x_1–x_{10});

– количество выходных параметров (нейронов), три возможных состояния стального каната:

1 — работоспособное, эксплуатация разрешена (y_1);

2 — дефекты в допустимых пределах, эксплуатация разрешена с ограничениями (y_2);

3 — достигнуто предельное состояние, эксплуатация запрещена (y_3);

– количество промежуточных слоев, а также количество нейронов в каждом промежуточном слое.

Таким образом, определена архитектура нейронной сети [13].

2. Заданы обучаемые параметры — параметры, которые изменяются (оптимизируются) в процессе обучения сети: значения синаптических весов *w* (сила связи между нейронами) и смещений *b*. Сначала эти значения задаются случайным образом, а далее в процессе обучения нейронной сети они будут оптимально настроены.

3. Реализован алгоритм прямого распространения (Forward propagation), т. е. вычисление нейронной сети на случайных параметрах *w, b*. На данном этапе необходимы обучающие данные, т. е. выборки входных параметров с известными выходными параметрами, как представлено в таблице 1.

Таблица 1

Данные для обучения нейронной сети

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	y
1	75	0	18	0	0	0	44	0	0	0	3
2	21	0	34	0	0	18	0	0	0	0	1
3	0	89	0	66	0	0	0	0	74	0	3
4	78	0	12	0	0	0	0	0	0	0	2
5	55	90	0	0	0	10	0	0	7	0	3
6	0	43	24	0	0	0	0	0	0	34	1
7	0	65	90	0	57	13	0	100	81	0	3
8	19	0	0	0	13	3	0	0	0	0	1
9	0	56	0	30	0	0	0	0	0	0	1
10	0	61	0	0	0	0	0	83	0	0	2
……	0	0	71	0	87	0	0	41	0	0	2
300	0	0	28	14	0	0	28	100	0	0	3

В таблице 1 десять входных параметров (x_1–x_{10}) являются браковочными показателями стальных канатов, выраженными в процентах от предельных значений. Таким образом, учитывается комбинация различных дефектов, которые могут быть выявлены экспертным путем с использованием 3d модели напряженно-деформированного состояния каната. Каждой такой комбинации соответствует определенное техническое состояние каната. При этом объем обучающей выборки 300. Объем контрольной выборки составил 30 выборок. Для проверки работы ИНС подготовлено 10 тестовых выборок, не участвовавших в процессе обучения.

4. Определена функция активации F. Функция активации необходима для добавления нелинейности и некого порогового значения активации на выходе каждого нейрона. Выбираем функцию активации Relu. Ниже представлена формула для определения уровня активации нейрона [14, 15]:

$$y = F\left(x_1 w_1 + x_2 w_2 + x_3 w_3 + b\right),$$

где y — уровень активации нейрона; $x_1 - x_3$ — уровни активации нейронов предыдущего слоя; $w_1 - w_3$ — синоптические веса; b — смещение функции.

На рис. 2 представлена схема формирования уровня активации одного нейрона.

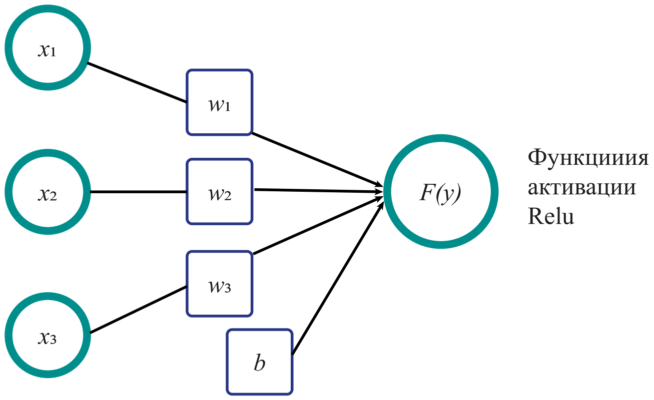


Рис. 2. Схема формирования уровня активации одного нейрона

5. Произведено нормирующее преобразование значений активации нейронов последнего результирующего слоя сети с помощью функции softmax, чтобы их значения были от 0 до 1, и сумма этих значений была равна 1. Другими словами, проведена интерпретация уровней активации нейронов в вероятностном смысле. В результате получено предсказание нейронной сети — состояние стального каната с некоторым доверительным уровнем для текущих значений синаптических весов (связей между нейронами) w и смещений b.

6. Вычисление ошибки E между вычисленными уровнями активации нейронов выходного слоя $y_{выч}$ и целевыми значениями активации нейронов выходного слоя $y_{цел}$ с помощью функции MSE (Евклидово расстояние) или функции кросс-энтропии (используется для определения расстояния между вероятностными распределениями). Следует помнить, что нейронная сеть обучается «с учителем», т. е. на примерах с заранее известными входами и выходами (обучающая выборка).

7. Реализация алгоритма обратного распространения ошибки (backpropagation), целью которого является решение задачи минимизации функции ошибки E в зависимости от синаптических весов (связей между нейронами) w и от смещений b. Для этого использован метод градиентного спуска.

8. Повторение всего алгоритма обучения на следующей обучающей выборке (или группе выборок) с целью минимизации ошибки нейронной сети посредством обновления связей (весов) между нейронами. Каждое такое повторение называют эпохой обучения. Задаем 2000 эпох обучения. Скорость обучения 0,0001. Функция ошибки Adam. После выполнения заданного количества эпох обучения нейронная сеть со всеми настройками сохраняется и может использоваться для предсказания выходных параметров (состояние стального каната) по входным параметрам (комбинации браковочных показателей), ранее не использованным в процессе обучения сети.

STATISTICA содержит два встроенных языка программирования: STATISTICA BASIC и SCL (командный язык). Метод построения нейронной сети в STATISTICA начинается с запуска модуля «Нейронные сети» во вкладке «Добыча данных» на основной рабочей панели программы. Интерфейс программы STATISTICA практически не отличается от известного интерфейса программы MS Office. Для построения ИНС в STATISTICA задаем архитектуру сети и параметры обучения, указанные в выше представленном алгоритме, нажатием соответствующих клавиш с помощью адаптированного интерфейса программы.

Непосредственное обучение нейронной сети активизируется нажатием клавиши «Обучить» в рабочем окне STATISTICA, после чего ИНС проверяется на заранее определенных контрольных выборках. Объем контрольной выборки равен 30. Условие остановки обучения — достижение контрольной производительности сети не ниже 95 %. При этом процесс обучения нейронной сети занял около 20 секунд.

Приведен пошаговый алгоритм для написания программного кода нейронной сети с использованием интерактивной библиотеки Scikit-learn на языке программирования Python [4–7]:

1. В первом блоке устанавливаются дополнительные интерактивные библиотеки (под библиотекой в данном случае понимается совокупность готовых подпрограмм, облегчающих процесс программирования) через ввод следующего кода (в скобках даны пояснения содержания или выполняемой команды кода):

!python -m pip install pandas (библиотека обработки и анализа данных);

!python -m pip install sklearn (библиотека машинного обучения);

!python -m pip install openpyxl (библиотека для работы с файлами Excel).

2. Во втором блоке импортируются модули через ввод следующего кода:

import pandas as pd (модуль обработки и анализа данных);

from sklearn.neural_network import MLPClassifier (модуль для работы с нейронными сетями);

from sklearn.metrics import confusion_matrix, classification_report (дополнительный модуль для работы с нейронными сетями);

import pickle (модуль, использованный для сохранения обученной нейронной сети);

import joblib (модуль, использованный для сохранения обученной нейронной сети).

3. Загрузка базы данных, т. е. набора обучающих данных. Необходимо заранее подготовить файл Excel с обучающими данными, выстроенными в формате, представленном в таблице 1 (рекомендуется более упрощенный вид — только столбцы входных и выходных параметров с их заголовками). Для этого вводим следующий программный код:

ds = pd.read_excel('book1.xlsx'), где book1.xlsx — файл Excel, который должен располагаться в одной папке с файлом создаваемой программы;

ds.head(10) (код для наглядного отображения первых 10 строк таблицы).

4. Далее присваиваются значения переменным X и Y написанием следующего программного кода:

X = ds.drop('Состояние каната',axis=1) (для переменной X присваиваются все столбцы, кроме столбца «Состояние каната» (указывается дословное название столбца);

y = ds['Состояние каната'] (для переменной Y присваивается столбец «Состояние каната»).

5. Построение и обучение нейронной сети посредством написания следующего кода (данный программный код, состоящий из двух строк, заменяет написание программного кода нейронной сети «вручную» из предыдущего алгоритма):

nn=MLPClassifier(hidden_layer_sizes=(8,8,8), max_iter=2000) (задается архитектура нейронной сети, а также параметры ее обучения; в данном случае 3 скрытых слоя, в каждом по 8 нейронов; количество эпох обучения 2000; по умолчанию выбраны функция активации Relu (код: activation='relu'), функция ошибки Adam (код: solver='adam'), скорость обучения 0,0001 (код: alpha=0.0001). Имеется возможность выбора различных параметров обучения нейронной сети через написание соответствующих программных кодов через запятую. Со всевозможными функциями активации, функциями ошибки и другими параметрами сети, их кодами можно ознакомиться на официальном сайте интерактивной библиотеки Scikit-learn;

nn.fit(X, y) (внедрение в нейронную сеть ранее заданных параметров X — входные переменные (браковочные показатели стальных канатов) и Y — выходная целевая переменная (техническое состояние стального каната).

После запуска данного блока нейронная сеть построена по заданной архитектуре и обучена по заданным параметрам обучения на обучающих данных (выборках), загруженных через таблицу файла Excel. Условие остановки обучения — достижение контрольной производительности сети в 95 %. Процесс обучения занял около 1,5 минуты.

Далее приведены процедуры сохранения и использования ИНС с применением интерактивной библиотеки Scikit-learn:

1. Сохранение обученной нейронной сети в отдельный файл написанием следующего программного кода:

joblib_file = "joblib_model.pkl" (создание файла joblib_model.pkl);

joblib.dump(nn, joblib_file) (сохранение нейронной сети nn в файле joblib_model.pkl).

После запуска данного блока программа создаст файл joblib_model.pkl в той же папке, в которой расположен сам файл программы.

2. Создание нового файла в PyCharm с разрешением py или в Jupyter с разрешением ipynb (файл в Jupyter создается для удобства, далее файл так или иначе должен будет сохранен в формате py).

3. Импорт (в новый файл) интерактивных библиотек написанием следующего программного кода:

import joblib (библиотека для сохранения и внедрения отдельных фрагментов программного кода);

import PySimpleGUI as sg (библиотека для графического оформления программы).

4. Загрузка в новый файл обученной нейронной сети через файл joblib_model.pkl, написание следующего программного кода:

joblib_file = "D:\Python\PycharmProjects/joblib_model.pkl" (указание полного пути к файлу joblib_model.pkl (индивидуально для каждого пользователя).

joblib_nn = joblib.load(joblib_file) (загрузка программного кода с обученной нейронной сетью).

5. Разработка графического оформления программы написанием следующего программного кода:

```
sg.theme('DarkAmber')
layout = [ [sg.Text('Определение состояния стального каната')];
[sg.Text('Введите 10 чисел через пробел'), sg.InputText()];
[sg.Button('Ok'), sg.Button('Cancel')]
window = sg.Window('Window Title', layout)
while True:
event, values = window.read()
if event == sg.WIN_CLOSED or event == 'Cancel':
break
#Нейронная сеть
Xnew = [list(map(int, values[0].split()))]
y = joblib_nn.predict(Xnew)
#Всплывающее окно
if event == 'Ok':
window.disappear()
sg.popup('Состояние каната ', y)
window.reappear()
print('Состояние каната ', y)
window.close()
```

После запуска данного блока программа выводит следующее рабочее окно (рис. 3).



Рис. 3. Рабочее окно написанной программы

В рабочем окне программы имеется строка для ввода 10 значений через пробел. В данной строке вводятся фактические проценты десяти различных дефектов стальных канатов от их допустимых значений. После ввода, например, следующих значений [20 0 30 0 0 10 0 0 0 0] и нажатия клавиши «Ок» программа переводит пользователя в следующее рабочее окно.

В рабочем окне (рис. 4) программа выводит информационное сообщение «Состояние каната [1]», что соответствует состоянию каната «работоспособное, эксплуатация разрешена».

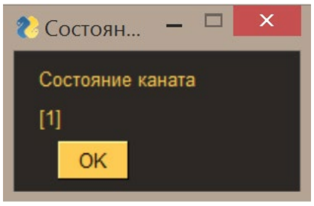


Рис. 4. Рабочее окно программы с определенным состоянием каната

Результаты исследования. Таким образом, разработаны две ИНС, имеющие одинаковую архитектуру, параметры обучения, состав, количество и объем обучающих, контрольных и тестовых выборок, но построенные разными методами. Результаты работы ИНС, построенной в программном комплексе STATISTICA, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты работы ИНС, построенной в STATISTICA

Выборка (тест)	Целевая	Выход сети	Состояние каната – 1 (доверительный уровень)	Состояние каната – 2 (доверительный уровень)	Состояние каната – 3 (доверительный уровень)
1	1	1	0,64	0,18	0,18
2	2	2	0,15	0,73	0,12
3	2	2	0,24	0,69	0,15
4	3	3	0,03	0,28	0,69
5	3	3	0,15	0,21	0,64
6	1	1	0,55	0,31	0,14
7	3	3	0,03	0,21	0,76
8	1	1	0,68	0,21	0,11
9	2	2	0,26	0,61	0,13
10	2	2	0,14	0,53	0,33

В столбце «Состояние каната — Целевая» показано заранее известное состояние каната, в столбце «Состояние каната — Выход» — результат работы нейронной сети; последующие столбцы указывают доверительные вероятности определения того или иного состояния каната, которые соответствуют уровням активации выходных нейронов сети.

По данным таблицы 2 видно, что нейронная сеть правильно определила состояние стального каната по браковочным показателям в 10 из 10 случаев, т. е. тестовая производительность составила 100 %. При этом среднее значение доверительных уровней определения состояния канатов составило 0,65.

Результаты работы ИНС, построенной с использованием интерактивной библиотеки Scikit-learn, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты работы ИНС, построенной с использованием Scikit-learn

Выборка (тест)	Целевая	Выход сети	Состояние каната – 1 (доверительный уровень)	Состояние каната – 2 (доверительный уровень)	Состояние каната – 3 (доверительный уровень)
1	1	1	0,58	0,13	0,29
2	2	2	0,19	0,51	0,19
3	2	2	0,22	0,56	0,30
4	3	3	0,29	0,25	0,46
5	3	3	0,21	0,22	0,57
6	1	1	0,57	0,22	0,21
7	3	3	0,21	0,22	0,57
8	1	1	0,63	0,22	0,15
9	2	2	0,22	0,57	0,21
10	2	2	0,33	0,45	0,21

По данным таблицы 3 видно, что нейронная сеть правильно определила состояние стального каната по браковочным показателям в 10 из 10 случаев, т. е. тестовая производительность составила 100 %. При этом среднее значение доверительных уровней определения состояния канатов составило 0,55.

Сравнения тестовой производительности нейронных сетей с одинаковой архитектурой и параметрами обучения, но построенных разными методами, показало, что ИНС, построенная на базе программного комплекса STATISTICA, и ИНС, построенная с использованием интерактивной библиотеки Scikit-learn, имеют тестовую производительность в 100 % при объеме тестовой выборки 10. Однако средний доверительный уровень (уровень активации «победившего» нейрона) определения состояния стального каната ИНС, построенной на базе программного комплекса STATISTICA, составил 0,65, тогда как тот же показатель ИНС, построенной с использованием интерактивной библиотеки Scikit-learn, составил 0,55, что на 15 % меньше.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты показали, что ИНС, построенная с использованием программного комплекса STATISTICA, при одинаковой архитектуре и параметрах обучения сети имеет более оптимальные программные алгоритмы по критериям доверительной вероятности оценки технического состояния стального каната и скорости обучения сети, в сравнении с ИНС, построенной с использованием бесплатной

библиотеки Scikit-learn. Это можно объяснить тем, что при разработке алгоритмов программных комплексов типа STATISTICA используются специализированные аппаратные комплексы, включающие в себя векторные и тензорные процессоры, которые выходят далеко за рамки возможностей среднестатистического прикладного разработчика и требуют привлечения высококвалифицированных специалистов. Однако показатель тестовой производительности ИНС оказался одинаковым для обеих ИНС. Важно отметить, что при оценке данного показателя объем тестовой выборки составил 10. При увеличении тестовой выборки данный показатель будет точнее. При всем этом достигнутый результат обосновывает использование ведущими мировыми научно-исследовательскими и коммерческими центрами в области искусственного интеллекта библиотек TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn.

Кроме того, полученный научный вывод позволит численно оценить и сравнить качество ИНС, имеющих одинаковую архитектуру и параметры обучения, но построенных различными методами, и может быть полезен как для будущих научных исследований в этой области, так и для выбора оптимальной среды построения ИНС в промышленной сфере. Разработанные программы могут применяться специалистами и экспертами как интеллектуальные системы поддержки принятия решений при диагностировании технического состояния стальных канатов.

Список литературы / References

1. Жернаков С.В. Применение технологии нейронных сетей для диагностики технического состояния авиационных двигателей. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2006;2(8):70–83.

Zhernakov SV. Application of Neural Network Technology to Diagnose the Technical Condition of Aircraft Engines. *Intellektual'nye Sistemy v Proizvodstve*. 2006;2(8):70–83. (In Russ.).

2. Панфилов А.В., Николаев Н.Н., Хван Р.В. Короткий А.А. Оценка возможных аварий канатных дорог по компетенциям работников с использованием нейронных сетей. *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2023;(1):79–86. https://doi.org/10.22281/2413-9920-2023-09-01-79-86

Panfilov AV, Nikolaev NN, Khvan RV, Korotkiy AA. Assessment of Possible Cable Car Accidents by Employee Competencies Using Neural Networks. *Nauchno-Tekhnicheskiy Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2023;(1):79–86. https://doi.org/10.22281/2413-9920-2023-09-01-79-86 (In Russ.).

3. Горева Т.И., Портнягин Н.Н., Пюкке Г.А. Нейросетевые модели диагностики технических систем. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2012;1(4):31–43.

Goreva TI, Pornjagin NN, Pjukke GA. Neural Network Model Diagnosis Technical Systems. *Bulletin of the Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center (KRASEC). Physicsal and Mathematicsal Sciences.* 2012;1(4):31–43. (In Russ.).

4. Beskopylny AN, Shcherban EM, Stelmakh SA, Mailyan LR, Meskhi B, Razveeva I, et al. Discovery and Classification of Defects on Facing Brick Specimens Using a Convolutional Neural Network. *Applied Sciences.* 2023;13(9):5413. https://doi.org/10.3390/app13095413

5. Stelmakh SA, Shcherban EM, Beskopylny AN, Mailyan LR, Meskhi B, Razveeva I, et al. Prediction of Mechanical Properties of Highly Functional Lightweight Fiber-Reinforced Concrete Based on Deep Neural Network and Ensemble Regression Trees Methods. *Materials.* 2022;15(19):6740. https://doi.org/10.3390/ma15196740

6. Beskopylny AN, Stelmakh SA, Shcherban EM, Mailyan LR, Meskhi B, Razveeva I, et al. Concrete Strength Prediction Using Machine Learning Methods CatBoost, k-Nearest Neighbors, Support Vector Regression. *Applied Sciences.* 2022;12(21):10864. https://doi.org/10.3390/app122110864

7. Beskopylny AN, Shcherban EM, Stelmakh SA, Mailyan LR, Meskhi B, Razveeva I, et al. Detecting Cracks in Aerated Concrete Samples Using a Convolutional Neural Network. *Applied Sciences.* 2023;13(3):1904. https://doi.org/10.3390/app13031904

8. Воронцов В.А., Федоров Е.А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата. *Труды МАИ*. 2015;2:1–35.

Vorontsov VA, Fedorov EA. Development of a Prototype of an Intelligent System for Operational Monitoring and Technical Condition of the Main Onboard Systems of the Spacecraft. *Trudy MAI*. 2015;2:1–35. (In Russ.).

9. Панфилов А.В., Месхи Б.Ч., Короткий А.А., Юсупов А.Р., Хван Р.В. *Программно-аппаратный комплекс визуально-измерительного контроля стальных канатов на основе компьютерного зрения и искусственного интеллекта.* Монография. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2023. 131 с.

Panfilov AV, Meskhi BCh, Korotkiy AA, Yusupov AR, Khvan RV. *Software and Hardware Complex for Visual and Measuring Control of Steel Ropes Based on Computer Vision and Artificial Intelligence.* Monograph. Rostov-on-Don: DSTU; 2023. 131 p. (In Russ.).

10. Панфилов А.В., Николаев Н.Н., Юсупов А.Р., Короткий А.А. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;(1):56–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69

Panfilov AV, Nikolaev NN, Yusupov AR, Korotkiy AA. Integral Risk Assessment in Steel Ropes Diagnostics Using Computer Vision. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(1):56–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69

11. Seyed Reza Ghoreishi, Tanguy Messager, Cartraud P, Davies P. Validity and Limitations of Linear Analytical Models for Steel Wire Strands under Axial Loading, Using a 3D FE Model. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2007;49(11):1251–1261. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.03.014

12. Frikha A, Cartraud P, Treyssède F. Mechanical Modeling of Helical Structures Accounting for Translational Invariance. Part 1: Static Behavior. *International Journal of Solids and Structures.* 2013;50(9):1373–1382. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.01.010

13. Короткий А.А., Панфилов А.В., Хван Р.В., Юсупов А.Р. Интегральный метод оценки дефектов на работоспособность стального каната с использованием искусственных нейронных сетей. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023;8:73–79. https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-18-73-79

Korotkiy AA, Panfilov AV, Khvan RV, Yusupov AR. Integral Method of Assessing Defects on the Operability of Steel Rope Using Artificial Neural Networks. *Transport, mining and construction engineering: science and production.* 2023;8:73–79. https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-18-73-79 (In Russ.).

14. Foti F, De Luca di Roseto A. Analytical and Finite Element Modelling of the Elastic–Plastic Behaviour of Metallic Strands under Axial–Torsional Loads. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2016;115–116:202–214. https://doi.org/10.1016/j. ijmecsci.2016.06.016

15. Spak K, Agnes G, Inman D. Cable Modelling and Internal Damping Developments. *Applied Mechanics Reviews.* 2013;65(1):010801. https://doi.org/10.1115/1.4023489

Об авторе:

Роман Владимирович Хван, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8662-6094, ORCID, ResearcherID, ScopusID, khvanroman@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 12.03.2024
Поступила после рецензирования 05.04.2024
Принята к публикации 11.04.2024

About the Author:

Roman V. Khvan, Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 8662-6094, ORCID, ResearcherID, ScopusID, khvanroman@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final version of the manuscript.

Received 12.03.2024
Revised 05.04.2024
Accepted 11.04.2024

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

УДК 621.762.1
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-78-89

Научная статья

EDN: BXGSNL

Диффузионные процессы при формировании структуры легированных порошковых сталей

М.С. Егоров[1] ✉, **Р.В. Егорова**[1], **Ж.В. Еремеева**[2]
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Национальный исследовательский технический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ aquavdonsk@mail.ru

Аннотация
Введение. Производство легированных порошковых сталей остается одним из перспективных направлений отечественной порошковой металлургии, что объясняется высоким уровнем эксплуатационных свойств и широкой номенклатурой получаемых изделий. Формирование таких материалов с требуемыми свойствами является сложным процессом, сопровождающимся многообразными явлениями, особое место среди которых занимает диффузионное легирование железной основы порошковых сталей. Создание легированных порошковых сталей в системе Fe-NiO и Fe-Ni имеет важное значение в металлургии и металлообработке при процессах нанесения покрытий и спекания для получения материалов с требуемыми свойствами. В процессе термической обработки для улучшения свойств материалов рассматривается и диффузионное взаимодействие никеля в железе. В последнее время успехи в изучении взаимной диффузии связаны с исследованием однородных систем. Однако взаимная диффузия даже в монокристаллах всегда протекает в пространственно-неоднородных условиях. В современной литературе недостаточно исследована взаимная диффузия в двух- и многокомпонентных порошковых системах. Поэтому целью работы является определение влияния диффузионного легирования никелем и оксидом никеля порошковой стали на основе железа на процессы получения порошковых материалов. В рамках обозначенной цели поставили задачи — исследовать диффузионные процессы взаимодействия пар в системе Fe-NiO и Fe-Ni, технологические режимы спекания и восстановительный отжиг образцов для достижения максимальных механических характеристик, которые бы обеспечивали формирование качественного материала.
Материалы и методы. В работе использовался железный порошок марки ПЖРВ 2.200.26 производства ПАО «Северсталь» (г. Череповец) и карбонильный порошок никелевый ПНК-УТ3 ГОСТ 97922–97, получаемый электролитическим методом или путем расщепления никелевой соли водным раствором. Перед использованием порошки проходили контроль на универсальном лазерном приборе измерения размера частиц модели FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTecplus и анализаторе субмикронных частиц Beckman COULTER №5. Для приготовления шихты использовали двухконусный смеситель марки RT-NM05S (Тайвань). Прессование осуществлялось на гидравлическом прессе модели TS0500-6 (Китай) в лабораторных пресс-формах. Образцы получали запрессовкой заранее упрочненного порошкового штифта ø 3 мм в шихту карбонильного никеля или NiO с дисперсностью 5–10 мкм. Восстановительный отжиг образцов осуществляли в муфельной лабораторной печи SNOL 6,7/1300 при температуре 700 °C и отжиг–спекание при 1050, 1150, 1250 °C в атмосфере водорода в течение 9 часов.

Фиксирование микроструктуры выполнялось на оптическом микроскопе «NEOPHOT-21». Тонкое строение структуры изучали на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N. Распределение концентрации элементов в диффузионной зоне Fe-Ni изучали методом локального рентгеноспектрального анализа на установке «Камебакс».
Результаты исследования. Пористость порошкового компонента после прессования составляла 12 %. Диффузия в системе железо-порошок никеля, восстановленном из оксида, в 5–10 раз выше, чем при использовании порошка карбонильного никеля. Установлено, что высокая скорость диффузии восстановленного никеля приводит к более быстрому и равномерному проникновению легирующих элементов в материал. Определены зависимости распределения концентрации никеля и его оксида после спекания, а также рассчитаны показатели диффузионного взаимодействия между железом, никелем и оксидом никеля после операции отжига, при котором происходит восстановление оксида никеля и спекание при различных температурах.
Обсуждение и заключение. Анализ полученных результатов свидетельствует о различной интенсивности диффузионных процессов в порошковых легированных сталях. Объясняется это как искаженностью кристаллической решетки исходных материалов, так и увеличенной сегрегацией дефектов (содержанием дефектных зон), которые образуются в процессе уплотнения материала. Данный подход к исследованию двухкомпонентной диффузии позволил сопоставить интенсивности диффузионного перераспределения элементов в зависимости от химического состава и температуры, а также оценить эффективную энергию активации диффузии. В результате выполненных исследований установлены количественные параметры распределения концентрации Ni в железную основу в зависимости от температуры спекания, влияющие на формирование качественного материала. Полученные результаты исследований интересны специалистам в области порошковой металлургии и термической обработки при разработке новых многокомпонентных сплавов.

Ключевые слова: порошковые стали, оксид никеля, никель, диффузия, структрообразование, спекание, сращивание, контактное сечение, механические свойства

Благодарности. За помощь в получении и обсуждении результатов авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам кафедры НИТУ МИСИС «ПМиФП» и лично В.Ю. Лопатину; сотрудникам кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ: д.т.н., профессору В.Н. Пустовойту, д.т.н., профессору Ю.М. Домбровскому; сотрудникам кафедры «Технология машиностроения, технологические машины и оборудование» ЮРГТУ (НПИ) имени М.А. Платова и лично В.Ю. Дорофееву.

Для цитирования. Егоров М.С., Егорова Р.В., Еремеева Ж.В. Диффузионные процессы в формировании структуры и свойств легированных порошковых сталей. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):78–89. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-78-89

Research Article

Diffusion Processes in the Formation of the Structure of Alloyed Powder Steels

Maxim S. Egorov[1] ✉, **Rimma V. Egorova**[1], **Zhanna V. Eremeeva**[2]
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] National Research Technical University “MISIS”, Moscow, Russian Federation
✉ aquavdonsk@mail.ru

Abstract
Introduction. The production of alloyed powder steels continues to be one of the most promising areas in domestic powder metallurgy. This is due to the high level of performance characteristics and the wide range of products that can be produced. Creating materials with desired properties is a complex process that involves various phenomena. One of these phenomena is the diffusion alloying of iron-based powder steels, which plays a special role in this process. The creation of alloyed powder steels in the Fe-NiO and Fe-Ni systems is important for metallurgy and metalworking, as they are used for coating and sintering to obtain materials with specific properties. In addition, the diffusion of nickel in iron during heat treatment is considered to improve material properties. Recent advances in the study of mutual diffusion are associated with the investigation of homogeneous systems. However, mutual diffusion even in single crystals always occurs under spatially inhomogeneous conditions. The modern literature has not sufficiently studied the mutual diffusion in two- and multi-component powder systems. Therefore, the aim of this work is to determine the effect of diffusion alloying with nickel and nickel oxide of iron-based powder steel on the processes of obtaining powder materials. Within the framework of this goal, the following tasks were set: to investigate the diffusion processes of interactions between pairs in the Fe-NiO and Fe-Ni systems, as well as to study technological modes of sintering and reducing annealing of samples in order to achieve maximum mechanical properties that would ensure the formation of a high-quality product.

Materials and Methods. The work used iron powder of the PZHRV 2.200.26 brand manufactured by PJSC Severstal (Cherepovet) and carbonyl nickel powder PNK-UT3, obtained by the electrolytic method or splitting nickel salt with an aqueous solution, according to GOST 97922–97. Before use, the powders were tested using a universal laser particle size measuring device model FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTecplus and a Beckman COULTER No. 5 submicron particle analyzer. A two-cone mixer RT-NM05S (Taiwan) was used to prepare the charge. Pressing was carried out on a hydraulic press model TS0500–6 (China) in laboratory molds. Samples were obtained by pressing pre-hardened 3 mm diameter powder pins into a carbonyl nickel or NiO charge with a dispersion of 5–10 microns. Recovery annealing was carried out in a SNOL 6.7/1300 laboratory muffle furnace at 700°C, followed by annealing-sintering at temperatures of 1050, 1150 and 1250°C in a hydrogen atmosphere for 9 hours.

Microstructural analysis was performed using a NEOPHOT-21 optical microscope. A Hitachi S-3400N scanning electron microscope was used to study the fine structure of the material. The distribution of element concentrations in the Fe-Ni diffusion zone was studied by local X-ray spectral analysis using the Kamebaks installation.

Results. The studies showed that the porosity of the powder component after pressing was 12%. Diffusion in the iron-nickel powder system was 5–10 times higher when using carbonyl nickel compared to oxide. It was also found that high diffusion rates of reduced nickel led to faster and more uniform penetration of alloying elements into the material. The dependences of the distribution of nickel concentration and its oxide content after sintering were determined, as well as the indicators of diffusion interaction between iron, nickel, and nickel oxide during annealing, where nickel oxide was reduced and sintering occurred at different temperatures.

Discussion and Conclusion. The analysis of the results obtained indicates a different intensity of diffusion processes in powder-alloyed steels. This can be explained by both the distortion of the crystal lattice of the starting materials and the increased segregation of defects, such as defective zones, that are formed during compaction of the material. This approach to studying two-component diffusion allowed us to compare the intensity of element diffusion redistribution depending on chemical composition and temperature, and to estimate the effective activation energy of diffusion. As a result of our studies, we have established quantitative parameters for the distribution of nickel concentration in the iron matrix, depending on sintering temperature, which affects the formation of high-quality materials. The research results obtained are of interest to specialists in powder metallurgy and heat treatment, as they can be used in the development of new multicomponent alloys.

Keywords: powder steels, nickel oxide, nickel, diffusion, structure formation, sintering, splicing, contact section, mechanical properties

Acknowledgements. The authors would like to express their sincere gratitude for the assistance provided by the staff of the Powder Metallurgy and Functional Coatings Department at NUST MISIS, especially V.Yu. Lopatin, as well as the staff of the Materials Science and Metal Technology Department at Don State Technical University, including Dr.Sci. (Eng.), Professor V.N. Pustovoit and Dr.Sci. (Eng.), Professor Yu.M. Dombrovsky. They would also like to thank the staff of the Mechanical Engineering and Technological Machines and Equipment Department at Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) and V.Yu. Dorofeev from for their assistance.

For Citation. Egorov MS, Egorova RV, Eremeeva ZhV. Diffusion Processes in the Formation of the Structure of Alloyed Powder Steels. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):78–89. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-78-89

Введение. Эксплуатационные свойства материала, как компактного, так и порошкового, в основном определяются химическим составом и состоянием структуры [1, 2]. В зависимости от назначения к микроструктуре предъявляют специфические требования [3]. Образование той или иной структуры порошковой стали в процессе спекания зависит также от процессов, протекающих при спекании и последующей термической обработке [4]. Процесс структурообразования порошковых материалов подвержен влиянию множества факторов [5]. Согласно [6] основными факторами являются методы их получения, гранулометрический состав, давление прессования, среда и время спекания, температура деформационного воздействия. Введение легирующих элементов, оказывающих влияние на процессы в поверхностных слоях частиц при твердофазном спекании, и присадок, образующих жидкую фазу, является наиболее эффективным способом повышения уровня эксплуатационных свойств [7]. Каждый из факторов имеет свои преимущества и недостатки.

Высоким уровнем эксплуатационных свойств обладают порошковые легированные стали. Они характеризуются однородной структурой и гомогенным распределением легирующих элементов по всей структуре стали [8]. При пропитке жидкими металлами, например, при использовании процесса цементации или карбонитрования легирующие элементы поглощаются поверхностными слоями материала. Это может

привести к формированию поверхностного слоя с высокой концентрацией легирующих элементов, но более глубокие слои могут оказаться менее насыщенными. Поэтому в таких случаях пропитка жидкими металлами наиболее эффективна для создания поверхностного слоя с желаемыми свойствами [9]. Диффузионное насыщение также может привести к неравномерному распределению легирующих элементов. Диффузия может быть ограничена только поверхностными слоями материала или внутренними дефектами, что ограничивает равномерность насыщения по всему объему детали. Выбор метода легирования зависит от цели, требуемых свойств, размера и формы детали, доступных ресурсов и других факторов, и он должен быть тщательно рассмотрен с учетом всех этих факторов.

Хорошо зарекомендовал себя способ введения никеля в порошковые конструкционные стали в виде добавок дисперсных оксидов никеля [10]. Восстановительный отжиг шихты на основе железа с равномерно распределенными в ней частицами NiO приводит к восстановлению и закреплению восстановившихся частиц никеля на железных частицах путем поверхностной и зернограничной диффузии. Применение такого частично легированного порошка позволяет при более низкой температуре получать детали с однородной структурой и высоким комплексом механических свойств. Активирование процесса гомогенизации порошковых сталей при использовании оксидов легирующих элементов в литературе объясняется только на качественном уровне [11]. Поэтому целью данной работы стало изучение процессов диффузионного взаимодействия в системах Fe-Ni и Fe-NiO для определения количественных параметров диффузии в них. Основной задачей в рамках поставленной цели явилось исследование влияния технологических режимов спекания и диффузионного отжига при диффузионном взаимодействии в системе пар Fe-Ni и Fe-NiO на формирование качественной порошковой стали.

Материалы и методы. В работе использовали порошок ПЖРВ 2.200.26, производства ПАО Северсталь (г. Череповец) и никелевый карбонильный порошок ПНК-УТ3 ГОСТ 97922-97, получаемый электролитическим методом или путем расщепления никелевой соли водным раствором [12]. Данные об общем химическом составе представлены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав порошка ПЖРВ 2.200.26

Марка порошка	Массовое содержание компонентов, %									
	Mo	Ni	C	O	H	Cu	Si	Mn	P	S
ПЖРВ 2.200.26	–	–	0,09	0,14	–	–	0,014	0,087	0,012	0,005

Технологические свойства порошка ПЖРВ 2.200.26: насыпная плотность — от 2,4 до 3,0 г/см^3; текучесть — не более 37 сек/50 г; плотность при Р=700 МПа — 7,0–7,05 г/см^3; прочность при плотности 6,5 г/см^3 — более 14 Н/мм^2. Аналогом являются порошки шведской фирмы Höganäs: AHC 100.29, NC 100.24, SC 100.26, ASC100.29. Область применения: детали амортизационной группы, детали трансмиссии, корпусные детали, шестерни, шатуны, муфты, втулки и др. К основным качествам порошка из никеля марки ПНК-УТ3 относят высокую коррозийную стойкость и устойчивость к агрессивным средам.

Порошковые композиции отличает высокая интенсивность граничных и поверхностных процессов, что при диффузии может привести к интенсификации массопереноса [13]. Проведено исследование закономерности структурообразования порошковых материалов. Моделирование процессов диффузионного взаимодействия легирующих компонентов производилось методом диффузионных пар [14].

Определение гранулометрического состава железного порошка марки ПЖРВ 2.200.26 было проведено на универсальном лазерном приборе измерения размера частиц модели FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTecplus (Германия) и анализаторе субмикронных частиц Beckman COULTER №5 (США).

Диффузионные процессы рассматривались на модельных парах порошков марок ПЖРВ 2.200.26 (порошок) – Ni (карбонильный); ПЖРВ 2.200.26 (порошок) – NiO, которые изготавливали методом запрессовки стержня из материала ПЖРВ 2.200.26 диаметром 3 мм в порошок карбонильного Ni или NiO дисперсностью 5–10 мкм. Проводили восстановительный отжиг образцов-пар при температуре 700 °С и отжиг-спекание при 1050 °С, 1150 °С, 1250 °С в атмосфере водорода в течение 9 часов [8].

Пара Fe-Ni относится к системам с неограниченной растворимостью компонентов. Железо и никель при температуре диффузионного отжига обладают ГЦК-решетками с близкими параметрами и образуют твердые растворы замещения. При охлаждении сплавы железа, содержащие менее 6 % никеля, перекристаллизовываются в ферритную фазу с ОЦК-решеткой. Металлографические исследования проводились после отжига с предварительной подготовкой шлифов в плоскости, перпендикулярной к исходной границе между компонентами пары.

Распределение концентрации элементов в диффузионной зоне Fe-Ni изучали методом локального рентгеноспектрального анализа на установке «Камебакс» производства Cameca (Франция). Съемку проводили в плоскости шлифа в направлении, перпендикулярном исходной границе между компонентами пары (вдоль оси первичного цилиндрического образца железа). С каждого шлифа по сечению диффузионной зоны с шагом 1 мкм записывали четыре концентрационные кривые распределения относительных интенсивностей K_{a1} линии железа и никеля. Устанавливали содержание никеля и железа в каждой исследуемой точке концентрационной кривой. Формирование диффузионной зоны увеличивается в 1,6–2,2 за счет присутствия оксида никеля в паре с железом по сравнению с чистым никелем [15]. Коэффициенты взаимной диффузии $\overline{D}$ при спекании в интервалах 1050 °C–1250 °C определялись в зависимости от содержания легирующих элементов [16].

Фиксирование микроструктуры выполнялось на оптическом микроскопе «NEOPHOT–21» Carl Zeiss Jena (Германия). Тонкое строение структуры изучали на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N (Тайвань).

Расчёты проводили с помощью математических вычислений по методу Матано [15].

Результаты исследования. Пористость порошкового компонента после прессования составляла 12 %. Гранулометрический состав железного порошка марки ПЖРВ 2.200.26 определен на гистограмме: наблюдается единственный пик, свидетельствующий о том, что порошок монофракционный (рис. 1). Средний размер частиц 98,5 мкм. Результаты представлены в таблице 2.

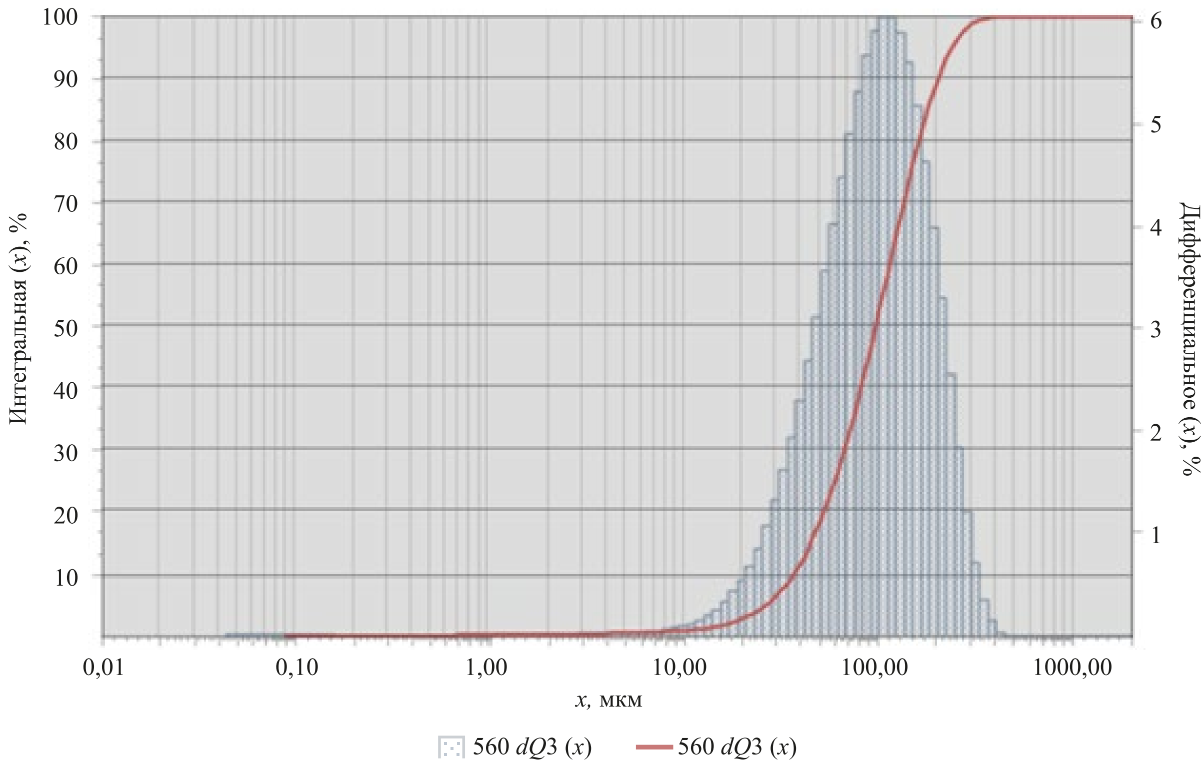


Рис. 1. Гранулометрический состав железного порошка ПЖРВ 2.200.26

Таблица 2

Гранулометрический состав железного порошка ПЖРВ 2.200.26

Количественная доля, %	5	10	25	50	75	90	95	99
Размерность, мкм	26,5	37,0	60,7	98,5	149,8	206,4	244,0	317,4

На рис. 2 *а* и *б* представлен общий вид порошка железа марки ПЖРВ 2.200.28. На рис. 2 *в, г, д, е, ж, з* представлена морфология частиц порошка железа, полученная на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N.

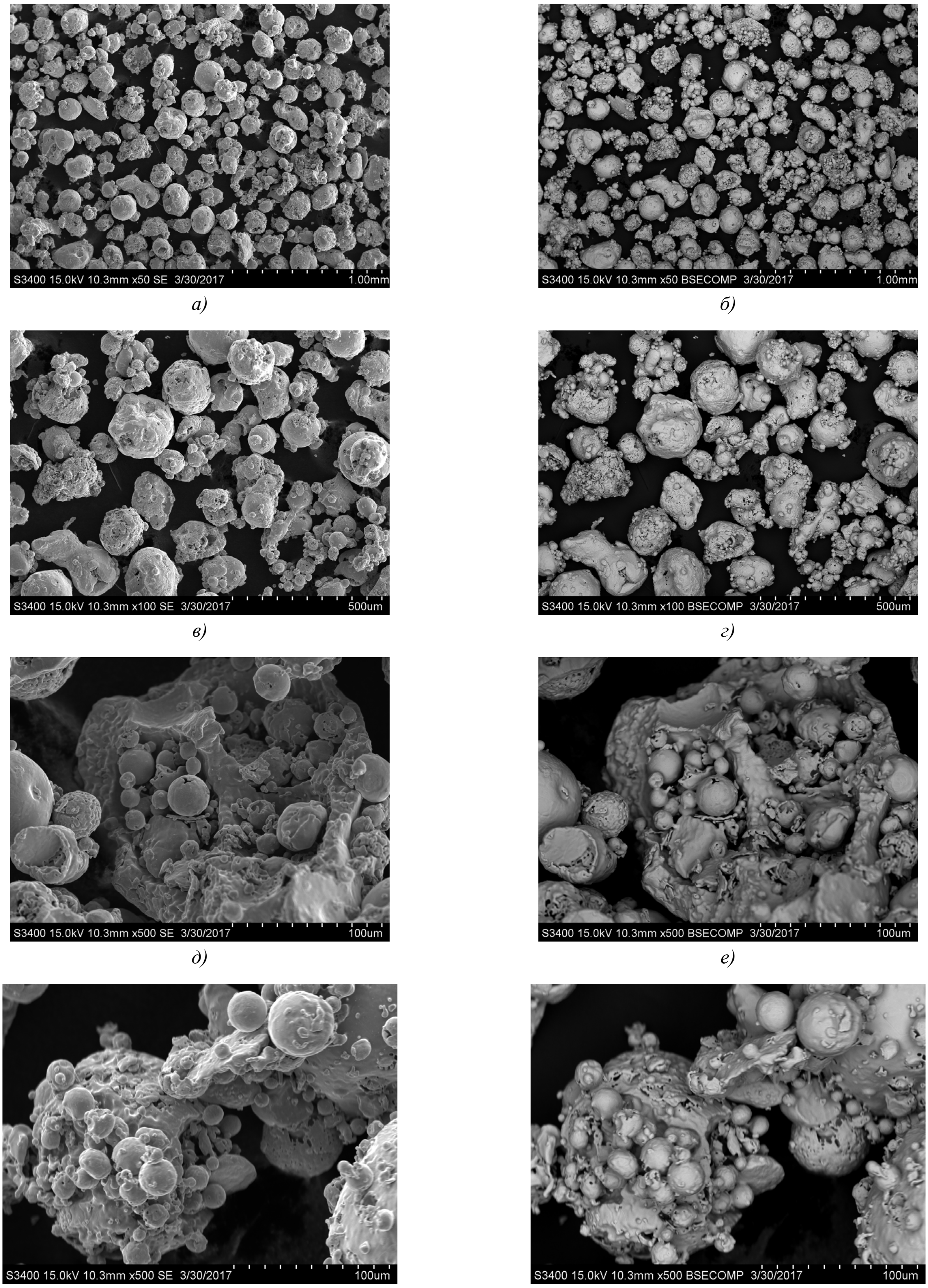
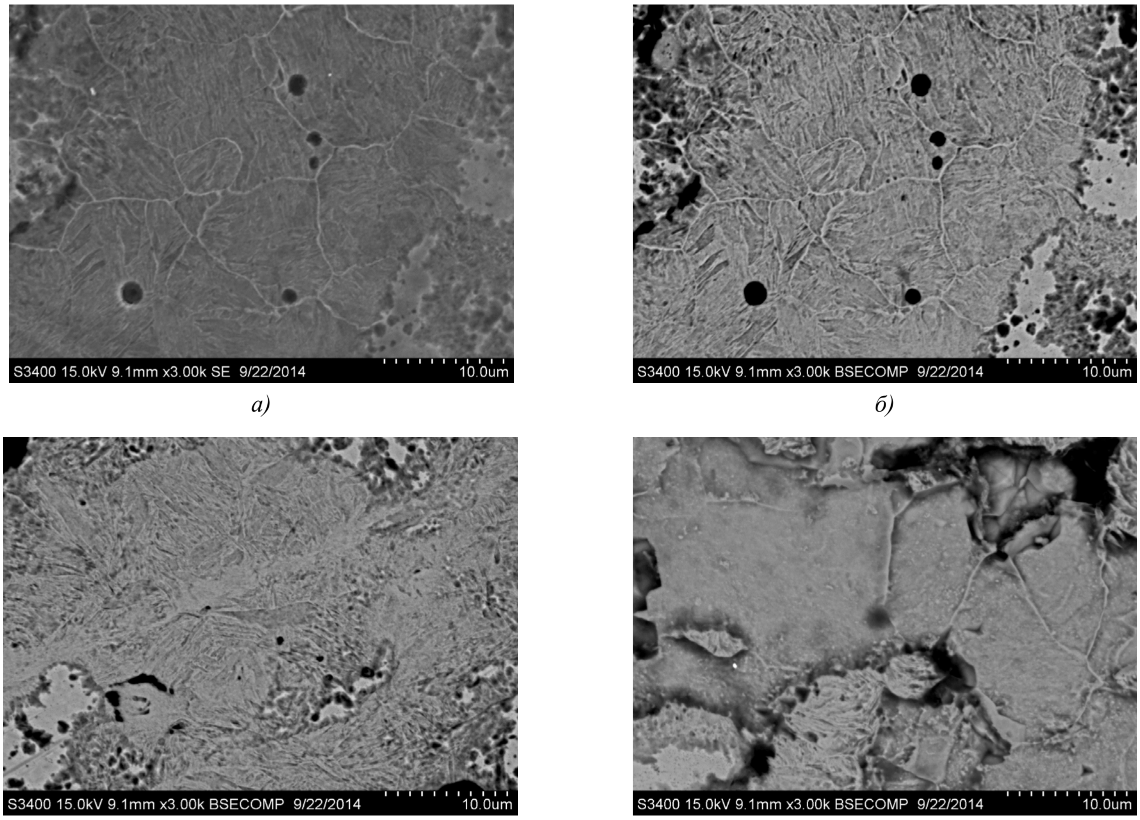


Рис. 2. РЭМ-изображение порошка железа ПЖРВ 2.200.28 съемка в:
а, в, д, ж — отраженных электронах; *б, г, е, з* — во вторичных электронах

Структура диффузионных зон состоит из ферритной и аустенитной фаз, разделенных границей. При температуре спекания 1 050 °С наблюдается пористая аустенитная фаза (особенно в образцах, содержащих оксид NiO), обусловленная высокими отрицательными объемными эффектами в процессе восстановления NiO. К более интенсивному уплотнению приводит спекание при повышении температуры до 1 150 °С и 1 250 °С, причем интенсификация наблюдается в образцах, восстановленных из оксида Ni. Значительное увеличение объемной текучести материала после восстановления частиц оксида никеля объясняется увеличенной структурной неравномерностью и неправильным расположением дислокаций, в сравнении со структурой

порошкового материала с частицами никеля. Последние отличаются равномерным расположением дислокаций, которые в меньшей степени подвержены аннигиляции при предварительном отжиге. Восстановление оксида никеля сопровождается движением межчастичной поверхности сращивания, что приводит к формированию дефектной структуры. В процессе восстановления NiO в объеме мигрирующей границы NiO-Ni образуется усложненная структура за счет разоориентированных дислокаций, которые не исчезают даже больших температурах спекания (рис. 3).



в) *г)*

Рис. 3. Микроструктуры сплава из порошка марки ПЖРВ 2.200.26
при введении в исходную шихту Ni в количестве:
а, б — 20 %; *в, г* — 40 % при температуре спекания 1 150 °C

Диффузия никеля в порошковое железо наиболее активно протекает по границам зерен с отклонением вглубь зерна. Это связано с более низкой энергией активации процесса зернограничной диффузии по сравнению с объемной. Высокая диффузионная проницательность границ зерен обусловлена их дефектной структурой. Преимущественное растворение никеля по границам зерен железа в большей степени проявляется при низкой температуре спекания (1 050 °C), когда объемная диффузия затруднена (рис. 4, 5).

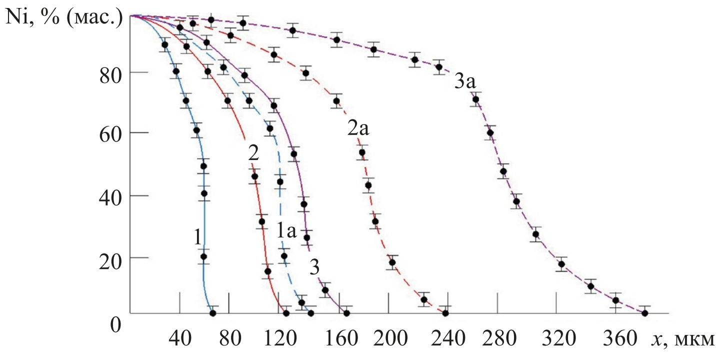


Рис. 4. Распределение концентрации Ni в диффузионной зоне пар Fe-Ni (сплошная линия 1, 2, 3)
и Fe-NiO (пунктирная линия 1 *а*, 2 *а*, 3 *а*) после спекания в атмосфере водорода при температурах:
1, 1 *а* — 1 050 °C; 2, 2 *а* — 1 150 °C; 3, 3 *а* — 1 250 °C

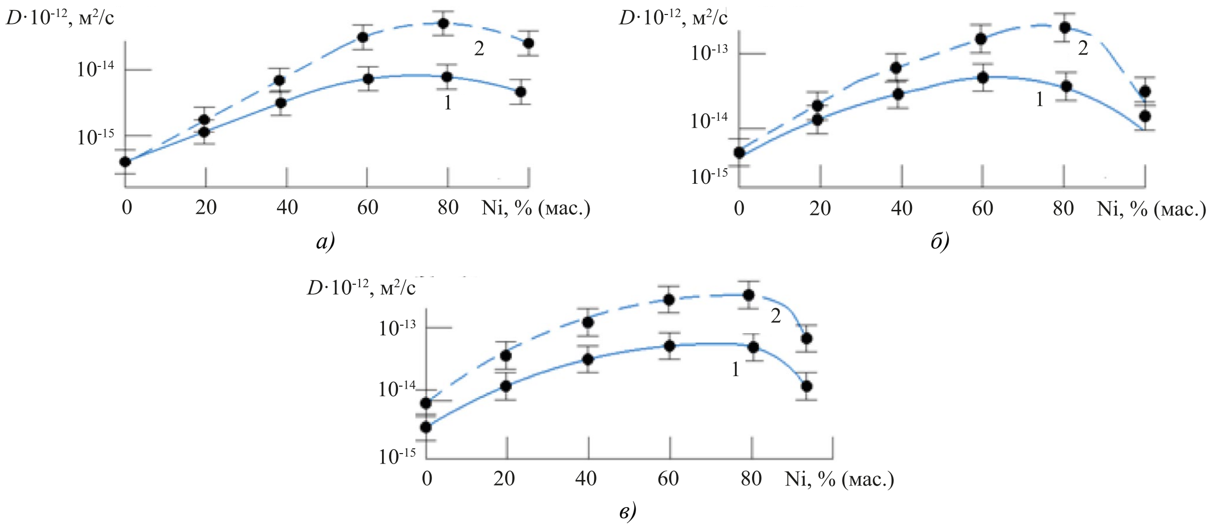


Рис. 5. Зависимости коэффициентов взаимной диффузии Fe-Ni (линия 1) и Fe-NiO (линия 2) после отжига и спекания при температурах: *а* — 1 050 °С, *б* —1 150 °С, *в* — 1 250 °С

На всех кривых коэффициент взаимной диффузии имеет максимум при концентрации никеля более 60 %. Эти данные совпадают с результатами работы, в которой проанализированы коэффициенты взаимной диффузии путем конечно-элементного моделирования простой модели. При температурах спекания 1 050 и 1 150 °С в этом интервале концентраций коэффициент взаимной диффузии в паре Fe-NiO примерно в 10 раз выше, чем в паре Fe-Ni [17]. При увеличении температуры спекания до 1 250 °С это различие существует во всем интервале концентраций, что также подтверждается результатами работы [18] и представлено на рис. 6.

Энергия активной диффузии $\overline{E}$ и предэкспоненциальный множитель $\overline{D_0}$ определялись на основе температурных зависимостей коэффициентов взаимной диффузии в соответствии с формулой Аррениуса [6]:

$$\overline{D} = \overline{D_0}\, exp - \frac{\overline{E}}{RT} \qquad (1)$$

Диффузионная энергия во всех рассматриваемых случаях получилась меньше приведенных в литературе [17] значений для компактных материалов.

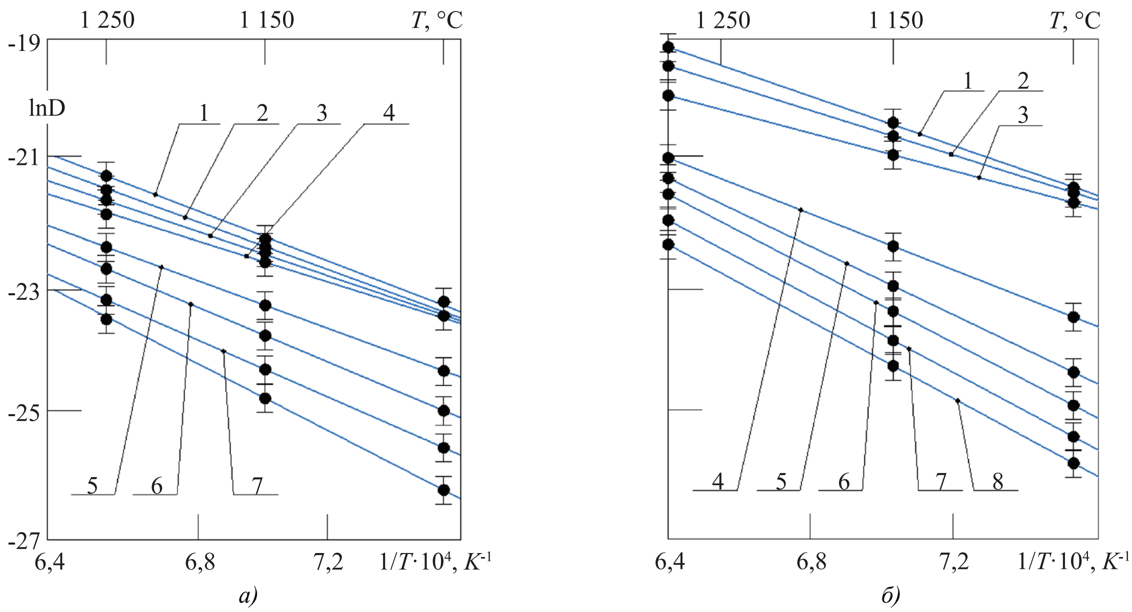


Рис. 6. Температурные зависимости коэффициентов взаимной диффузии: *а* — системы Fe-Ni; *б* — системы Fe-NiO от концентрации NiO: 1 — 90 %, 2 — 80 %, 3 — 70 %, 4 — 50 %, 5 — 40 %, 6 — 30 %, 7 — 20 %, 8 — 10 %

На увеличение процессов поверхностной и зернограничной диффузии, реализующихся по механизмам с малыми энергиями активации, а также диффузии по дефектам оказывает влияние пористость и структурная активность порошкового никелевого компонента. Энергия активации (рис. 7) и предэкспоненциальный множитель имеют минимум в области концентрации 50–70 % Ni (рис. 8). Значения $\overline{E}$ подходят для систем Fe-NiO и NiO. Предэкспоненциальный множитель $\overline{D_0}$ в системе Fe-NiO значительно больше, чем в системе железо-никель, увеличивает коэффициент взаимной диффузии элементов при восстановительном отжиге и спекании. При термомеханическом воздействии, как и при диффузии углерода в кристаллическую решетку железа, происходит смещение межчастичной поверхности сращивания, что может послужить началом развития трещины [19]. Это связано с повышенной дефектностью структуры никеля после восстановления, что подтверждается данными рентгенографического анализа [19]. Плотность дислокаций порошка никеля, восстановленного из оксида при температуре 700 °С, составляет $1{,}8 \cdot 10^{10}$, а карбонильного никеля — $1{,}0 \cdot 10^{8}$ $см^{-2}$.

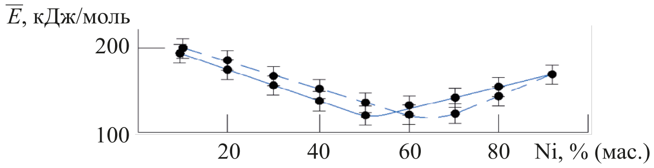


Рис. 7. Энергия активации взаимной диффузии $\overline{E}$ (кДж/моль) в системах Fe-Ni (пунктирная линия) и Fe-NiO (сплошная линия)

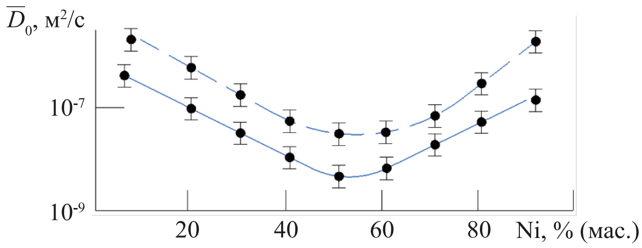


Рис. 8. Предэкспоненциальный множитель $\overline{D_0}$ ($м^2/с$) в системах Fe-Ni (пунктирная линия) и Fe-NiO (сплошная линия)

Обсуждение и заключение. Процесс диффузионного отжига образцов, полученных из железного порошка ПЖРВ 2.200.26, сопровождается так называемым «эффектом Френкеля», когда атомы, ионы или дефекты в кристаллическом материале могут перемещаться или диффундировать при повышенной температуре. Во время диффузионного отжига возможны диффузия и рекомбинация дефектов, таких как вакансии (отсутствие атома в кристаллической решетке) и вакансионные дефекты (атомы на неправильных местах в кристаллической решетке). В результате этого кристалл может преобразовываться или избавляться от этих дефектов. При соседстве вакансии и вакансионного дефекта образуется пара Френкеля. Эта пара может перемещаться в кристалле путем диффузии и, если пара Френкеля встречает одну из этих вакансий, она может уничтожить два дефекта и таким образом очистить кристалл от дефектов.

При спекании легированных порошковых сталей происходит взаимная диффузия атомов между порошковыми частицами и образование связей на межфазных границах. Диффузия легирующих элементов в порошковых сталях приводит к формированию интерметаллических соединений и образованию дисперсионных и основных фаз. Диффузионные процессы могут быть ускорены при повышенных температурах спекания.

В результате выполненных исследований установлены количественные параметры распределения концентрации Ni в железную основу в зависимости от температуры спекания. Минимальное расстояние, на которое распределяется никель, составляет 70 мкм при температуре спекания 1 050 °С. При спекании 1 250 °С, зона распределения чистого никеля увеличивается до 165 мкм. Однако при использовании оксида никеля эта зона увеличивается свыше 360 мкм при той же температуре. Это свидетельствует от том, что диффузия в системе с порошком никеля, восстановленным из оксида, в 5–10 раз выше, чем при использовании порошка карбонильного никеля. Это может иметь важное значение при процессах легирования или насыщения материалов. Высокая скорость диффузии восстановленного никеля может привести к более быстрому и равномерному проникновению легирующих элементов в материал. Это может быть полезно при создании поверхностного слоя с определенными свойствами или увеличении прочности и других механических свойств материала.

Анализ полученных результатов свидетельствует о различной интенсивности диффузионных процессов в порошковых легированных сталях, что связано не только с искаженностью кристаллической решетки исходных материалов, но и с повышенной концентрацией дефектов, получаемой в процессе прессования заготовок. В целом понимание диффузионных процессов и их влияния на формирование структуры легированных порошковых сталей позволяет оптимизировать процессы спекания и получать материалы с желаемыми свойствами и микроструктурой. Таким образом, выбор между порошком никеля, восстановленным из оксида, и порошком карбонильного никеля должен быть основан на конкретных требованиях и условиях процесса. Дальнейшие исследования и эксперименты могут помочь более полно изучить применимость таких вариантов и определить наиболее эффективный метод для конкретной задачи

Список литературы / References

1. Гасанов Б.Г., Жердицкий Н.Т., Сиротин П.В., Юханаев А.М. Гомогенизация среднелегированной порошковой стали. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2013;(3(172)):25–28.

Gasanov BG, Zherditsky NT, Sirotin PV, Juhanaev AM. Homogenization of Medium Alloy Powder Steel. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2013;(3(172)):25–28. (In Russ.).

2. Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е., Золотухин В.И., Сергеев А.Н., Калинин А.А., Бреки А.Д. и др. *Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов*. Тула: Тульский государственный университет; 2016. 235 с.

Shorshorov MKh, Gvozdev AE, Zolotukhin VI, Sergeev AN, Kalinin AA, Breki AD, et al. *Development of Advanced Technologies for the Production and Processing of Metals, Alloys, powder and Composite Nanomaterials.* Tula: Tula State University; 2016. 235 p. (In Russ.).

3. Петросян А.С., Галстян Л.З. Особенности термической обработки порошковых сталей марки П40ХН с повышенными свойствами. *Вестник национального политехнического университета Армении. Металлургия, материаловедение, недропользование*. 2017;(2):40–48.

Petrosyan HS, Galstyan LZ. Peculiarities of Heat Treatment of the П40ХН – Grade Powder Steels with Improved Properties. *Proceedings of NPUA. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering* 2017;(2):40–48. (In Russ.).

4. Дорофеев В.Ю., Свиридова А.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., Кочкарова Х.С. Тамадаев В.Г. Особенности термической обработки микролегированных горячедеформированных порошковых сталей. В: *Труды 12-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка.» Минск, 07–09 апреля 2021 года*. В 2-х частях. Часть 1. Минск: Республиканское унитарное предприятие "Издательский дом "Белорусская наука"; 2021. С. 184–197.

Dorofeev VYu, Sviridova AN, Berezhnoi YuM, Bessarabov EN, Kochkarova KhS. Tamadaev VG. Features of Heattreatment of Microalloyed Hot-Deformed Powder Steels. In: *Proceedings of the 12th International Symposium “Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding”. Minsk, April 07–09, 2021.* In 2 parts. Part 1. Minsk: Respublikanskoe unitarnoe predpriyatie “Izdatel'skii dom “Belorusskaya nauka”; 2021. P. 184–197. (In Russ.).

5. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Порошковая металлургия в Беларуси и мировые тенденции развития. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2019;(1):98–106. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106

Vityaz PA, Ilyuschenko AF, Savich VV. Powder Metallurgy in Belarus and Global Development Trends. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2019;(1):98–106. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106 (In Russ.).

6. Гуревич Ю.Г., Анциферов В.Н., Савиных Л.М., Оглезнева С.А., Буланов В.Я. *Износостойкие композиционные материалы.* Екатеринбург: Уральское отделение РАН; 2005. 216 с.

Gurevich YuG, Antsiferov VN, Savinykh LM, Oglezneva SA, Bulanov VYa. *Wear-Resistant Composite Materials*. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005. 216 p. (In Russ.).

7. Скориков А.В., Климов Ю.Е., Ульяновская Э.В. Кинетика формирования диффузионных слоев при хромировании порошковых сталей в расплавах солей с нагревом токами высокой частоты. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2014;(2(177)):7881. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kinetika-formirovaniya-diffuzionnyh-sloev-pri-hromirovanii-poroshkovyh-staley-v-rasplavah-soley-s-nagrevom-tokami-vysokoy-chastoty/viewer (дата обращения: 01.03.2024).

Skorikov AV, Klimov YuE, Ulyanovskaya EV. Kinetics of Diffusion Layers the Plating of Powder Steels in Molten Salt With Heating by High-Frequency Currents. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2014;(2(177)):7881. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kinetika-formirovaniya-diffuzionnyh-sloev-pri-hromirovanii-poroshkovyh-staley-v-rasplavah-soley-s-nagrevom-tokami-vysokoy-chastoty/viewer (accessed: 01.03.2024) (In Russ.).

8. Дьячкова Л.Н. Особенности формирования структуры и свойств порошковых сталей с добавками, активирующими диффузионные процессы при спекании. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук.* 2020;65(1):43–53. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53

Dyachkova LN. Features of the Formation of the Structure and Properties of Powder Steels with Additives that Activate Diffusion Processes during Sintering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series.* 2020;65(1):43–53. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53 (In Russ.).

9. Скориков А.В., Ульяновская Э.В. Кинетика формирования диффузионных слоев при поверхностном легировании хромом порошковых сталей методом электролиза ионных расплавов солей. В: *Труды III международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» С. Петербург-Челябинск-Новочеркасск-Владивосток, 16–19 мая 2017 года.* Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2017. С. 94–97.

Skorikov AV, Ulyanovskaya EV. Kinetics of the Formation of Diffusion Layers during Surface Chromium Alloying of Powder Steels by Electrolysis of Ionic Melts of Salts. In: *Proceedings of the III International Scientific and Technical conference "Prom-Engineering", St. Petersburg-Chelyabinsk-Novocherkassk-Vladivostok, May 16–19, 2017*. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center; 2017. P. 94–97. (In Russ.).

10. Гасанов Б.Г., Ефимов А.Д., Юханаев А.М. Феноменология взаимной диффузии в межслойных зонах при спекании порошковых биметаллических материалов. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2013;(5(174)):26–29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologiya-vzaimnoy-diffuzii-v-mezhsloynyh-zonah-pri-spekanii-poroshkovyh-bimetallicheskih-materialov/viewer (дата обращения: 01.03.2024).

Gasanov BG, Efimov AD, Yukhanaev AM. Phenomenology of Mutual Diffusion in Interlayer Zones during Porous Bimetal Materials Sintering. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2013;(5(174)):26–29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologiya-vzaimnoy-diffuzii-v-mezhsloynyh-zonah-pri-spekanii-poroshkovyh-bimetallicheskih-materialov/viewer (accessed: 01.03.2024) (In Russ.).

11. Rojek J, Nosewicz S, Mazdziarz M, Kowalczyk P, Wawrzyk K, Lumelskyj D. Modeling of a Sintering Process at Various Scales. *Procedia Engineering.* 2017;177:263–270. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.02.210

12. Егоров М.С., Егорова Р.В. Развитие межчастичного сращивания при спекании металлических порошков с добавлением углерода. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;(3):55–65. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-55-65

Egorov MS, Egorova RV. Development of Interparticle Bonding during Sintering of Metal Powders with the Addition of Carbon. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(3):55-65. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-55-65

13. Михеев А.А., Зеер Г.М., Королева Ю.П., Зеленкова Е.Г., Сартпаева А.Б. Формирование микроструктуры и переходной зоны при диффузионной сварке стали 45 через порошковый слой. *Сварочное производство.* 2015;(9):18–21.

Mikheev AA, Zeer GM, Koroleva YuP, Zelenkova EG, Sartpaeva AB. Formation of the Microstructure and Transition Zone during Diffusion Welding of Steel 45 Through a Powder Layer. *Svarochnoe proizvodstvo.* 2015;(9):18–21. (In Russ.).

14. Дорофеев В.Ю., Свиридова А.Н., Свистун Л.И. Влияние микролегирования натрием на контактную выносливость и механические свойства горячедеформированных порошковых сталей. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2019;(4):4–13. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-4-13

Dorofeyev VYu, Sviridova AN, Svistun LI. The Effect of Sodium Microalloying on the Rolling Contact Fatigue and Mechanical Properties of Hot-Deformed Powder Steels. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2019;(4):4–13. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-4-13 (In Russ.).

15. Буланов В.Я., Крашанинин В.А., Оглезнева С.А. О процессе гомогенизации легирующих элементов в наносистемах Fe-Mo, Fe-Cu, Fe-Cr, Fe-Ni в зависимости от температуры и времени спекания. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2008;(2):50–55.

Bulanov VYa, Krashaninin VA, Oglezneva SA. On Process of Alloying Element Homogenization in the Fe-Mo, Fe-Cu, Fe-Cr, Fe-Ni Nanosystems Depending on Temperature and Sintering Time. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2008;(2):50–55. (In Russ.).

16. Gilardi R, Alzati L, Oro R., Hryha E, Nyborg L, Berg S, et al. Reactivity of Carbon Based Materials forPowder Metallurgy Parts and Hard Metal Powders Manufacturing. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy.* 2016;63(7):548–554. https://doi.org/10.2497/JJSPM.63.548

17. Горохов В.М., Гучек В.Н., Тарусов И.Н. Структура и свойства порошковых низколегированных сталей, изготовленных из смесей, содержащих оксиды легирующих элементов, методом прессования и спекания. В кн.: *Порошковая металлургия.* Минск: Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорусская наука»»; 2019. P. 5–18. (In Russ.).

Gorokhov VM, Guchek VN, Tarusov IN. Structure and Properties of Powdered Low-Alloy Steels Made from Mixtures Containing Oxides of Alloying Elements by Pressing and Sintering. In book: *Poroshkovaya metallurgiya.* Minsk: Respublikanskoe unitarnoe predpriyatie "Izdatel'skii dom "Belorusskaya nauka"; 2019. P. 5–18. (In Russ.).

18. Егоров М.С., Егорова Р.В., Ковтун М.В. Влияние содержания углерода на формирование контактной поверхности при горячей допрессовке**.** *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;(2):90–101 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101

Egorov MS, Egorova RV, Kovtun MV. Influence of Carbon Content on the Formation of a Contact Interparticle Surface during Hot Post-Pressing. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(2):90–101. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101

19. Dorofeyev VYu, Sviridova AN, Samoilov VA. Formation of Structure and Properties of Hot-Deformed Powder Steels Microalloyed with Sodium and Calcium in the Process of Thermal and Thermomechanical Treatment. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* 2021;62(6):723–731 https://doi.org/10.3103/S1067821221060080

Об авторах:

Максим Сергеевич Егоров, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 2126-1642, ORCID, ScopusID, aquavdonsk@mail.ru

Римма Викторовна Егорова, кандидат технических наук, доцент, кафедры кибербезопасности Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8182-6940, ORCID, rimmaruminskaya@gmail.com

Жанна Владимировна Еремеева, доктор технических наук, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий Национального исследовательского технического университета «МИСИС» (РФ, г. Москва, Ленинский пр. д.4., стр. 1) SPIN-код: 8182-6940, ORCID, ScopusID, ResearcherID, eremeeva-shanna@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

М.С. Егоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Р.В. Егорова — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Ж.В. Еремеева — подготовка образцов для исследований на сканирующем микроскопе, анализ результатов микроструктуры и построение математических зависимостей.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 01.03.2024
Поступила после рецензирования 12.03.2024
Принята к публикации 25.03.2024

About the Authors:

Maxim S. Egorov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 2126-1642, ScopusID, ORCID, aquavdonsk@mail.ru

Rimma V. Egorova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Cybersecurity Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 8182-6940, ORCID, rimmaruminskaya@gmail.com

Zhanna V. Eremeeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Powder Metallurgy and Functional Coatings Department, National University of Science and Technology MISiS (4, Leninsky Ave., building 1, Moscow, 119049, RF) SPIN-code: 8182-6940, ScopusID, ResearcherID, ORCID, eremeeva-shanna@yandex.ru

Claimed Contributorship:

MS Egorov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of the conclusions;

RV Egorova: academic advising, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions;

ZhV Eremeeva: preparation of samples for research on a scanning microscope, analysis of microstructure results and construction of mathematical dependencies.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 01.03.2024
Revised 12.03.2024
Accepted 25.03.2024

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

УДК 620.1; 539.612; 620.197.6

https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-90-100

Научная статья

EDN: CHUJHA

Разрушение внутренних антикоррозионных полимерных покрытий нефтепромысловых труб при эксплуатации

Е.С. Сургаева[1,2] ✉, **П.Е. Юдин**[1,2], **А.П. Амосов**[1]

[1] Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

[2] ООО «НПЦ «Самара», г. Самара, Российская Федерация

✉ gavriluk@npcsamara.ru

Аннотация

Введение. Отказ оборудования — труб нефтепромыслового комплекса — по причине развития коррозионных процессов приводит к многочисленным убыткам, разрушению дорогостоящих комплектующих, нарушению работы технологических процессов и, как следствие, экологическому ущербу. Применение антикоррозионных покрытий в качестве внутренней защиты нефтепромысловых труб имеет много преимуществ и позволяет значительно снизить скорость коррозии, но не обеспечивает полного решения данной проблемы. По многочисленным причинам происходят разрушения внутренних антикоррозионных полимерных покрытий (ВАКПП). Недостаточно исследованными являются причины и механизмы разрушения. Поэтому целью данной работы стало проведение анализа разрушений внутренних антикоррозионных полимерных покрытий на практических примерах, что позволило сформировать и выделить основные причины повреждения и деградации покрытий при эксплуатации.

Материалы и методы. Для изучения повреждений внутренних полимерных антикоррозионных покрытий в процессе эксплуатации и установления основных причин разрушения проводился комплекс лабораторных исследований. Первоначальным этапом исследования являлось подробное изучение материалов обстоятельства аварии: условия эксплуатации трубы с покрытием (состав эксплуатируемой среды, температура, давление, наличие механических примесей), наработка, тип применяемого полимерного материала. Второй этап — лабораторные исследования покрытия: определение толщины слоя, диэлектрической сплошности, адгезионной прочности (методом нормального отрыва), исследование термокинетических свойств посредством дифференциально-сканирующей каллометрии (ДСК), изучение структуры покрытия при помощи сканирующей электронной микроскопии.

Результаты исследования. Изучены практические примеры разрушения внутренних антикоррозионных покрытий нефтепромысловых труб. Для каждого исследуемого случая выявлены характерные признаки деградации антикоррозионного покрытия. Показаны изменения микроструктуры покрытий, а также образование продуктов коррозии в зависимости от характера разрушения. Делается акцент на исследовании степени полимеризации покрытия как с помощью традиционного метода определения параметра ΔTg с помощью ДСК, так и на основе косвенных признаков, обнаруженных в ходе микроструктурных исследований.

Обсуждение и заключение. Рассмотренные в статье практические случаи повреждения внутреннего антикоррозийного покрытия труб нефтегазового комплекса позволили разделить причины разрушения на три группы: эксплуатационные, технологические и дефекты в ходе транспортировки, хранения и строительно-монтажных работ. Сформулированы рекомендации производителям, позволяющие получать покрытия с максимальными характеристиками, присущими используемому лакокрасочному материалу. Отмечено, что соблюдение представленных рекомендаций позволяет получать в условиях Западной Сибири внутренние

антикоррозионные полимерные покрытия с гарантированным ресурсом не менее 15 лет (что подтверждается опытом успешной эксплуатации таких трубопроводов в ПАО «Сургутнефтегаз» и ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь»).

Ключевые слова: внутреннее антикоррозионное полимерное покрытие, разрушение покрытия, адгезионная прочность, эксплуатационные дефекты, отслоение покрытия, продукты коррозии, растрескивания, вздутия

Благодарности. Авторы выражают благодарность ведущему инженеру ООО «НПЦ «Самара» Д.М. Давыдову за помощь в проведении исследований покрытий на растровом электронном микроскопе.

Для цитирования. Сургаева Е.С., Юдин П.Е., Амосов А.П. Разрушение внутренних антикоррозионных полимерных покрытий нефтепромысловых труб при эксплуатации. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):90–100. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-90-100

Research Article

Destruction of Internal Anticorrosive Polymer Coatings of Oilfield Pipes during Operation

Ekaterina S. Surgaeva[1,2] ✉, **Pavel E. Yudin[1,2]**, **Aleksandr P. Amosov[1]**
[1] Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
[2] Samara Scientific and Production Center LLC, Samara, Russian Federation
✉ gavriluk@npcsamara.ru

Abstract
Introduction. Failure of equipment, specifically pipes in the oilfield complex, due to the development of corrosion processes leads to numerous losses, destruction of expensive components, disruption of technological processes and, as a result, environmental damage. The use of anticorrosive coatings as an internal protection of oilfield pipes offers many advantages and can significantly reduce the rate of corrosion, but does not provide a complete solution to this problem. Destruction of internal anticorrosive polymer coatings (IACPC) occurs for numerous reasons. The causes and mechanisms of destruction are insufficiently investigated. Therefore, the aim of this work was to analyze the destruction of internal anticorrosive polymer coatings using practical examples, which made it possible to form and identify the main causes of damage and degradation of coatings during operation.
Materials and Methods. A complex of laboratory studies was carried out to study the damage to internal polymer anticorrosive coatings during operation and to establish the main causes of destruction. The initial phase of the investigation involved a detailed examination of the materials related to the accident circumstances, including the operating conditions of the coated pipeline (composition of the operating medium, temperature, pressure, and presence of mechanical impurities), operation time, and type of polymeric material used. The second phase involved laboratory testing of the coating, which included the determination of layer thickness, dielectric continuity, adhesive strength (by the normal separation method), investigation of thermokinetic properties by means of differential scanning callometry (DSC), study of the coating structure using scanning electron microscopy.
Results. Practical examples of the destruction of internal anticorrosive coatings of oilfield pipes were analyzed. For each case, characteristic signs of degradation of the anti-corrosive coating were identified. Changes in the microstructure of the coatings, as well as the formation of corrosion products, were observed depending on the type of destruction. The focus was on studying the degree of polymerization of the coating, both using the traditional method of determining the ΔTg parameter using DSC, and based on indirect signs detected during microscopic studies.
Discussion and Conclusion. The practical cases of damage to the internal anticorrosion coating of pipes of the oil and gas complex considered in the article allowed us to divide the causes of destruction into three groups: operational, technological and defects during transportation, storage and construction and installation works. Based on these findings, we have formulated recommendations for manufacturers to ensure maximum performance from their coatings. It is noted that the compliance with the presented recommendations makes it possible to obtain internal anticorrosive polymer coatings with a minimum guaranteed lifespan of 15 years, as demonstrated by the successful operations of pipelines in Western Siberia, such as those operated by Surgutneftegaz PJSC and LUKOIL – Western Siberia LLC.

Keywords: internal anticorrosive polymer coating, destruction of the coating, adhesive strength, operational defects, peeling of the coating, corrosion products, cracking, blistering

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to D.M. Davydov, leading engineer at Samara Scientific and Production Center LLC, for his valuable assistance in conducting coating studies using a scanning electron microscope.

For Citation. Surgaeva ES, Yudin PE, Amosov AP. Destruction of Internal Anticorrosive Polymer Coatings of Oilfield Pipes during Operation. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):90–100. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-90-100

Введение. Отказы нефтепромысловых труб по причине внутренней коррозии приводят к многочисленным убыткам [1]. Основной ущерб заключается в разрушении основных комплектующих, что приводит к нарушению работы технологических процессов и высокому уровню экономического и экологического ущерба [2]. На сегодняшний день применяются различные методы защиты внутренней поверхности труб: ингибиторы коррозии, использование коррозионностойких сталей, неметаллических материалов и внутренних антикоррозионных покрытий [3]. Все эти методы могут уменьшать скорость коррозии в конкретных условиях эксплуатации [4]. Наиболее перспективным способом защиты металла от коррозии является применение антикоррозионных полимерных покрытий, препятствующих воздействию агрессивных компонентов транспортируемой среды на внутреннюю поверхность трубы [5]. Применение внутреннего антикоррозионного полимерного покрытия позволяет значительно уменьшить и свести к минимуму разрушение металла по причине коррозии, обеспечивая длительную безаварийную работу оборудования [6]. К числу наиболее надежных и универсальных методов защиты внутренней поверхности нефтепромысловых труб относят полимерные покрытия на жидкой и порошковой основе [7], при этом предпочтение отдается порошковому материалу на основе эпоксидных смол [8].

Одним из основных преимуществ использования антикоррозионных полимерных покрытий является возможность применения материалов с относительно низкой стоимостью взамен более дорогостоящих. Примером является использование труб из углеродистой стали с нанесенным антикоррозионным покрытием вместо труб из высоколегированной коррозионностойкой стали. К тому же, благодаря низкой шероховатости полимерного покрытия, увеличивается пропускная способность труб [9], многократно снижается образование солевых [10], асфальто-смолистых и парафиновых отложений [11]. Преимущества внутренних антикоррозионных покрытий на полимерной основе перед химическим методом защиты (путем применения ингибиторов коррозии) заключаются в следующем:

1. Внутренние антикоррозионные полимерные покрытия являются более эффективными, так как образуют физический барьер между агрессивной средой и металлом. Ингибиторы воздействуют на коррозионный процесс только при непосредственном контакте с поверхностью металла.

2. Полимерные покрытия отличаются более продолжительным сроком службы, в то время как действие ингибитора может прекратиться при истощении его концентрации в растворе.

3. При соблюдении технического регламента антикоррозионные покрытия легко наносятся на внутреннюю поверхность металла. При использовании ингибиторов коррозии требуется тщательный расчет концентрации и способа введения в рабочую среду.

Учитывая, что ингибиторы коррозии — это химические кислотные растворы, их применение может отрицательно отразиться на свойствах материала насосно-компрессорной трубы (НКТ). В данном случае при контакте ингибитора с поверхностью металла трубы, а также его попадании в резьбовое соединение «ниппель НКТ – муфта» может наблюдаться разрушение металла по механизму водородного растрескивания [12].

Тем не менее, полимерные антикоррозионные покрытия имеют и ряд недостатков, к которым можно отнести: старение полимерной основы, диффузия транспортируемой среды через покрытие, относительно низкая прочность при ударном воздействии [5].

Эффективность и долговечность антикоррозионного покрытия определяются целым комплексом факторов, которые влияют на защитную способность. Самым важным показателем покрытий является адгезионная прочность полимера с металлической подложкой, зависящая от технологии проведения операций нанесения. Здесь важно качество применяемых материалов, соблюдение правильной технологии подготовки поверхности металла и самого процесса окрашивания, температурных режимов сушки [13]. Наряду с вышеперечисленными требованиями, стабильность защитных свойств полимерного покрытия не всегда зависит от самого покрытия, а определяется также условиями и параметрами эксплуатации [9]. К основным технологическим факторам, способствующим деградации и преждевременному разрушению ВАКПП, можно отнести: нарушение работы скважины, обусловленное резким перепадом температуры перекачиваемого продукта или перекачкой продукта с температурой выше проектной; превышение давления; наличие высокой коррозионной активности добываемой продукции; неправильно подобранный тип покрытия под конкретные условия эксплуатации.

Нередки случаи повреждения полимерного покрытия в процессе скребкования (очистки) ствола скважины от образовавшихся асфальтосмолопарафинистых отложений (АСПО). Применение скребка неправильной конструкции способствует нарушению целостности поверхностного слоя покрытия. Образуются царапины, задиры, которые снижают барьерные свойства полимерного покрытия в процессе дальнейшей эксплуатации.

Существующая литература [14] по вопросам внутренней защиты нефтепромыслового оборудования с использованием полимерных покрытий рассматривает лишь малую часть проблемы и не отражает полной картины разрушения ВАКПП. Важно отметить, что в зависимости от изменяющихся факторов, таких как условия эксплуатации, тип применяемого полимерного материала, технологических операций подготовки и нанесения покрытия, разрушение антикоррозионного покрытия может иметь различный характер. Таким образом, ввиду сложности кинетики протекания процесса разрушения покрытия и отсутствия практической базы, не всегда достоверно возможно определить истинную причину повреждения покрытия. Проведенные авторами многочисленные исследования труб нефтепромыслового комплекса позволили рассмотреть некоторые новые конкретные примеры разрушения ВАКПП при эксплуатации и выделить основные причины, ведущие к деградации и отказу внутренних антикоррозионных покрытий с учетом новых факторов.

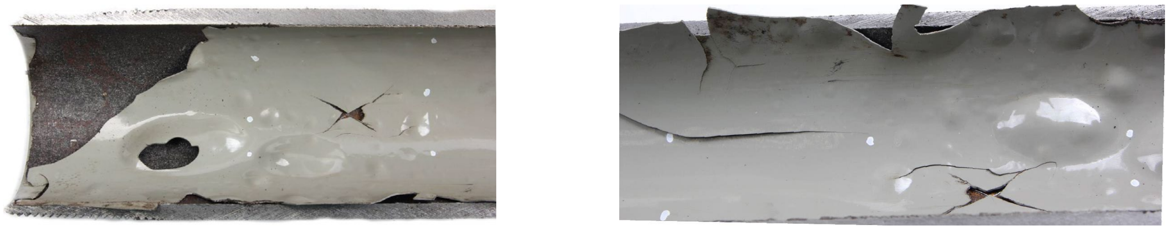
Материалы и методы. В качестве образцов для исследования были выбраны следующие образцы с повреждением внутреннего антикоррозионного покрытия:

1. Фрагмент НКТ Ø73×5,5 мм с повреждением покрытия в виде вздутий по всей длине образца. Наработка НКТ на отказ составила 934 суток (рис. 1 *а*, *б*).
2. Фрагмент НКТ Ø73×5,5 мм с разрушением покрытия в виде обширных участков с отслоениями и вздутиями, локализованными преимущественно в ниппельной части НКТ. Наработка на отказ — 146 суток (рис. 2 *а*, *б*).
3. Фрагмент НКТ Ø73×5,5 мм с разнооттеночностью внутреннего покрытия (рис. 3 *а*, *б*).
4. Фрагмент трубопровода Ø325×8 мм с разрушением покрытия вплоть до оголения металлической подложки и образования сквозного дефекта трубы (рис. 4 *а*, *б*).
5. Фрагмент трубопровода Ø159×8 мм с образованием многочисленных вздутий покрытия и его разрушением (рис. 5).



а) *б)*

Рис. 1. Повреждения внутреннего антикоррозионного покрытия:
а, б — вздутия покрытия



а) *б)*

Рис. 2. Разрушение внутреннего антикоррозионного полимерного покрытия: *а* — вздутия покрытия;
б — растрескивания покрытия



а) *б)*

Рис. 3. Разнооттеночность внутреннего антикоррозионного покрытия НКТ:
а — светло-коричневый оттенок покрытия;
б — темно-коричневый оттенок покрытия



а) *б)*

Рис. 4. Повреждение внутреннего антикоррозионного покрытия трубопровода Ø325×8 мм:
а — общий вид разрушения покрытия; *б* — прожоги покрытия



Рис. 5. Разрушение внутреннего антикоррозионного покрытия трубопровода Ø159×8 мм

С целью выявления причин отказа ВАКПП проводился комплексный анализ исследования в два этапа. Первоначальным этапом являлось подробное изучение условий эксплуатации трубы с покрытием (состав эксплуатируемой среды, температура, давление, наличие механических примесей), наработки и типа применяемого полимерного материала. Второй этап включал в себя проведение лабораторных исследований покрытия: визуальный осмотр, определение толщины внутреннего покрытия по ГОСТ 31 993–2013, контроль диэлектрической сплошности по ASTM G62, определение адгезионной прочности методом нормального отрыва по ГОСТ 32 299–2013, исследование термокинетических свойств посредством дифференциально-сканирующей каллометрии (ДСК). Микроструктурные исследования проводились при помощи растрового электронного микроскопа «TESCAN VEGA3 SBH», оснащенного приставкой для энергодисперсионного анализа.

Результаты исследования. Микроструктурные исследования антикоррозионного покрытия НКТ (образец № 1) показали полное отслоение покрытия от металла трубы с развитием коррозионных процессов. Образование коррозионного слоя толщиной ~122 мкм обусловлено проникновением агрессивных компонентов транспортируемой среды к металлической подложке в течение длительного времени (рис. 6). Исследования не выявили каких-либо отклонений и несовершенств покрытия в виде локальных участков со сниженной толщиной покрытия или наличием частиц дроби под слоем покрытия. Эти два случая являются довольно часто встречающимися при дробеструйной обработке поверхности металла перед нанесением антикоррозионной системы. Поэтому разрушение покрытия по такому механизму в данном случае было исключено [16]. Перечисленные признаки указывают на повреждение антикоррозионного покрытия, вызванного эксплуатационным воздействием за счет проведенных внутрискважинных работ по удалению загрязнений и пробок в стволе НКТ с помощью применения химических реагентов — соляно-кислотных обработок. Нельзя исключать также превышение давления в системе, в результате которого происходит проникновение газа в объем покрытия в результате диффузионной проницаемости и его резкое расширение, что способствует разрушению покрытия по декомпрессионному механизму с образованием вздутий [1].

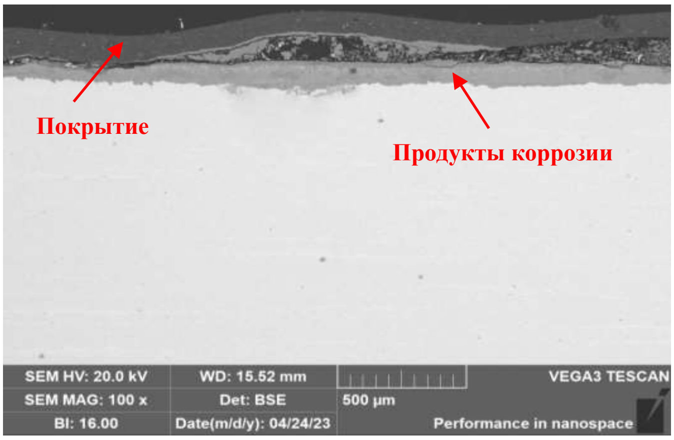
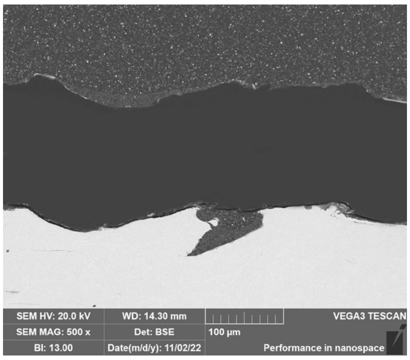


Рис. 6. Микроструктурные исследования антикоррозионного покрытия в области его повреждения

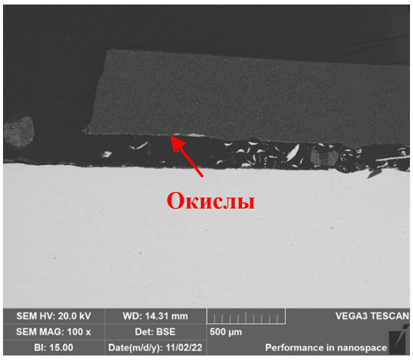
По результатам исследований фрагмента НКТ (образец № 2) установлено, что на участках с сохранением целостности покрытия каких-либо отклонений не выявлено, однако наблюдается снижение адгезионной прочности покрытия ниппельной области в 2 раза по сравнению с результатами адгезии в центральной части трубы. Определение термокинетических характеристик осуществлялось методом дифференциально-сканирующей спектроскопии (ДСК) с определением температуры стеклования (Tg) покрытия по всей длине НКТ. Результаты анализа не выявили значительного разброса показателей Tg исследуемых участков, что может свидетельствовать о равномерном нагреве в процессе полимеризации покрытия.

Микроструктурный анализ антикоррозионной системы установил, что отслоение покрытия происходит по грунтовочному слою и характеризуется когезионным характером разрушения. К тому же на поверхности металла трубы и отслоившейся части покрытия присутствуют частицы оксидов (рис. 7, таблица 1). В данном случае включения оксидов железа на внутренней поверхности трубы образовались из-за некачественной очистки и подготовки поверхности перед нанесением покрытия.

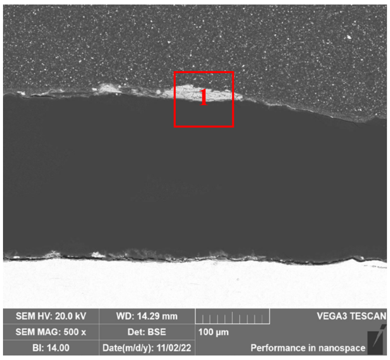
Рассмотренный пример является частым случаем разрушения полимерного покрытия, связанный с нарушением технологических процессов подготовки внутренней поверхности трубы перед окраской.



а)



б)



в)

Рис. 7. Микроструктурные исследования покрытия в области его разрушения:
а — отслоение покрытия от металла;
б — наличие слоя окислов; *в* — химический состав окислов

Таблица 1

Химический состав слоя оксидов, масс. %

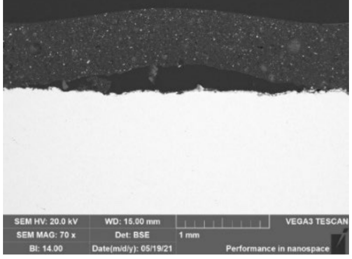
Элемент/Область	C	O	Si	Mn	Fe
1	19,10	27,31	0,83	0,24	50,78

При визуальном осмотре внутренней поверхности НКТ (образец № 3) установлено, что для антикоррозионного покрытия характерна разнооттеночность, при этом не выявлено образование видимых дефектов покрытия в виде вздутий, отслоений и трещин. При определении диэлектрической сплошности на участке с темно-коричневым покрытием (рис. 3 *б*) установлены многочисленные пробои, свидетельствующие о нарушении целостности полимерной композиции с наличием микрорастрескиваний. Учитывая результаты проведенных исследований, можно утверждать, что неоднородность оттенка антикоррозионной системы связана с недополимеризацией покрытия в процессе сушки. Процесс полимеризации достигается за счет воздействия высокой температуры в специализированных печах посредством химических реакций сшивки полимерных цепей. Для равномерного прогрева покрытия основным требованиям в процессе отверждения является поддержание постоянной температуры. Нарушение температурно-временных режимов полимеризации напрямую влияет на скорость протекающих химических реакций и, как следствие, деструкцию самого полимера.

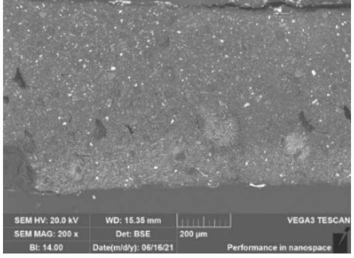
Довольно часто встречаются случаи повреждения антикоррозионного покрытия, вызванные техногенными причинами. Образование повреждений покрытия носит случайный характер и заблаговременно предвидеть их появление невозможно. Дефекты подобного характера могут возникнуть на различных этапах, начиная от производства труб и заканчивая их транспортировкой к потребителю. Конкретно можно выделить следующие: неправильный подбор материала покрытия под условия эксплуатации, механические повреждения, образовавшиеся в результате спуско-подъемных работ или в процессе скребкования, нарушение регламента при транспортировке и хранении трубной продукции с покрытием, а также влияние человеческого фактора.

В качестве примера можно рассмотреть повреждение внутреннего покрытия на порошковой основе, вызванное ремонтными работами трубопровода Ø325×8 мм (образец № 4). Поврежденность покрытия носит интенсивный характер вплоть до оголения металлической подложки и образования сквозного дефекта трубы. Внешние признаки (наличие вздутий, изменение цвета покрытия на черный) свидетельствуют о дополнительном температурном воздействии на трубу при температуре выше 250 °С (рис. 4 *а*). В данном случае проведенные сварочные работы в процессе ремонта трубопровода повлекли за собой образование прожогов и прогаров покрытия (рис. 4 *б*). Из-за нарушения целостности и сплошности покрытия транспортируемая среда легко проникает сквозь полимерный слой к металлу трубы, активизируя процессы коррозии. Интенсивность коррозии может усиливаться за счет содержания в транспортируемом флюиде коррозионно-агрессивных компонентов (растворенные газы CO_2, H_2S), а также за счет скорости движения потока среды, температуры и давления в трубопроводе.

Нередко встречаются случаи, когда разрушение антикоррозионного покрытия может иметь сложный механизм и сопровождается комплексным сочетанием сразу нескольких факторов. Микроструктурные исследования покрытия трубопровода Ø325×8 мм (образец № 5) показали, что разрушение покрытия протекает по механизму декомпрессионного отслаивания, протекающего под влиянием резкого перепада давления [1]. Проникновение газов через покрытие способствует снижению барьерных свойств антикоррозионного покрытия, вызывая зарождение и развитие коррозионных процессов металла трубы с образованием продуктов коррозии (рис. 8). Кроме того, учитывая масштабы и характер разрушения слоя антикоррозионного покрытия, можно установить, что основной причиной повреждения трубопровода является локальное термическое воздействие, прикладываемое с внутренней поверхности трубы. В данном случае высокотемпературный нагрев приводит к перегреву внутреннего антикоррозионного покрытия и его деструкции.



а)



б)

Рис. 8 Микроструктурные исследования антикоррозионного покрытия в области разрушения: *а* — отслоение покрытия; *б* — деструкция полимерного покрытия

Обсуждение и заключение. Исследовав практические примеры повреждения внутренних антикоррозионных покрытий, можно разделить причины их разрушения на три группы: эксплуатационные, технологические и дефекты, образовавшиеся в ходе транспортировки, хранения и строительно-монтажных работ.

Эксплуатационные дефекты могут быть связаны с различными внешними воздействиями, такими как использование соляно-кислотных обработок (СКО) и наличие механических примесей. Наиболее распространено — превышение максимально допустимой температуры для данного типа покрытия (как правило на 20–30 °C ниже температуры стеклования) или высокие значения парциальных давлений сероводорода (H_2S) и углекислого газа (CO_2).

Комплексную оценку способности покрытия противостоять эксплуатационным воздействиям в условиях добычи и транспортировки нефти возможно провести по ГОСТ 58 346–2019[1] и нормативных документов, разработанных на его основе[2, 3, 4]. Несмотря на разночтения в методах проведения автоклавных испытаний, все представленные НД могут адекватно оценивать качество ВАКПП. Однако прогнозирование ресурса безаварийной работы на их основе невозможно. Разработка модели прогнозирования безаварийного ресурса является наиболее актуальной задачей. Она, в свою очередь, базируется на накоплении, описании и систематизации причин разрушений ВАКПП.

К технологическим дефектам можно отнести все дефекты и несовершенства, образующиеся в ходе подготовки поверхности трубы перед окраской и нанесением (полимеризацией) внутренних покрытий. Получение необходимых свойств для конкретной системы покрытий возможно при соблюдении требований к подготовке, указанных в таблице 2. Для порошковых термоотверждаемых покрытий должен выполняться критерий — $\Delta Tg \leq 3$ ºC. Контроль степени отверждения жидких ЛКМ возможно проводить только косвенными методами, например, сравнением твердости по Бухгольцу контролируемого покрытия с эталонным.

Таблица 2

Требования к внутренней поверхности

Параметр	Показатель	Норма	Метод испытаний
Степень обезжиривания	Не более	1	ГОСТ 9.402
Наличие окислов	Степень очистки, не менее	Sa 2,5	ГОСТ Р ИСО 8 501–1
Запыленность	Количество пыли, не более	2 балл	ISO 8 502–3
	Размер частиц пыли, не более	2 класс	
Шероховатость	Средняя высота микронеровностей Rz, мкм, в пределах	40–100	ISO 8 503–2
Наличие водорастворимых солей	Содержание солей мг/м^2, не более	20	ИСО 8 502–6 ИСО 8 502–9

Дефекты, образовавшиеся в ходе транспортировки, хранения и строительно-монтажных работ могут быть сведены к минимальным значениям только при повышении культуры производства и/или введении инспекционного (строительного) контроля.

[1] ГОСТ 58 346–2019. *Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности Общие технические требования* URL: https://files.stroyinf.ru/Data/705/70584.pdf (дата обращения: 02.03.2024).
[2] П4-06.03 ЕТТ-0111. *Единые технические требования компании. Трубная продукция для промысловых и технологических трубопроводов, трубная продукция общего назначения.* Москва: Роснефть; 2023. 119 с.
[3] ТТТ-01.02.04-01. *Типовые технические требования на изготовление и поставку оборудования. Трубная продукция, в том числе с внутренней и внешней изоляцией.* Версия 4.0. Москва: Газпром нефть; 2022. 70 с.
[4] *Технические требования на трубную продукцию с внутренним и наружным покрытием для строительства трубопроводов.* ПАО «Сургутнефтегаз» от 03.06.2022 г.

Соблюдение представленных рекомендаций позволяет получать ВАКПП НГПТ с гарантированным ресурсом в условиях Западной Сибири не менее 15 лет. Это подтверждается опытом успешной эксплуатации таких трубопроводов в ПАО «Сургутнефтегаз» и ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь».

Список литературы / References

1. Князева Ж.В., Юдин П.Е., Петров С.С., Максимук А.В., Прокудин А.В. Особенности эксплуатации насосно-компрессорных труб в условиях скважин коррозионного фонда. *Коррозия «Территории «Нефтегаз»»*. 2018;2(40):50–54.

Knyazeva ZhV, Yudin PE, Petrov SS, Maksimuk AV, Prokudin AV. Features of Operation of Pumping and Compressor Pipes in Conditions of Wells of a Corrosive Fund. *Korroziya "Territorii "Neftegaz"*. 2018;2(40):50–54. (In Russ.).

2. Петров С.С., Васин Р.А., Князева Ж.В., Андриянов Д.И., Сургаева Е.С. Коррозионное разрушение металла нефтегазопроводных труб в процессе эксплуатации и при лабораторных испытаниях. *Нефтегазовое дело*. 2020:18(4).102–112. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2020-4-102-112

Petrov SS, Vasin RA, Knyazeva ZhV, Andriyanov DI, Surgaeva ES. Metal Corrosion Destruction of Oil and Gas Pipelines during Operation and Laboratory Tests. *Petroleum Engineering*. 2020;18(4):102–112. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2020-4-102-112 (In Russ.).

3. Старцев А.И., Терентьев А.Н. Насосно-компрессорные трубы с полимерным покрытием. *Научный Лидер*. 2022;40:9–17.

Startsev AI, Terent'ev AN. Pumping and Compressor Pipes with Polymer Coating. *Nauchnyi Lider*. 2022;40:9–17. (In Russ.).

4. Jha K, Dhakad D, Singh B. Critical Review on Corrosive Properties of Metals and Polymers in Oil and Gas Pipelines. In book: Prakash C, Singh S, Krolczyk G, Pabla B. (eds). *Advances in Materials Science and Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Singapore: Springer; 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4059-2_8

5. Протасов В.Н. *Теория и практика применения полимерных покрытий в оборудование и сооружения нефтегазовой отрасли.* Москва. Недра. 2007. 374 с.

Protasov VN. *Theory and Practice of Polymer Coatings Application in Equipment and Structures of the Oil and Gas Industry*. Moscow. Nedra. 2007. 374 p. (In Russ.).

6. Byrnes T. Pipeline coatings. In book: El-Sherik AM. (ed.) *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies. Production and Transmission. Woodhead Publishing Series in Energy*. Woodhead Publishing; 2017. P. 563–591.

7. Швецов М.В., Бикбов Г.Б., Калачев И.Ф. Преимущество порошковых покрытий для защиты НКТ. *Экспозиция Нефть Газ*. 2015;5(44):35–37.

Shvetsov MV, Bikbov GB, Kalachev IF. The Advantage of Powder Coatings for the Protection of Tubing. *Exposition Oil & Gas*. 2015;5(44):35–37. (In Russ.).

8. Ханина Ю.А., Алибеков С.Я. Защитные полимерные покрытия для трубопроводов. В: *Труды международной междисциплинарной научной конференции «Безопасность человека и устойчивое развитие общества перед вызовами глобальных трансформаций»*. Йошкар-Ола: Издательство Поволжский государственный технологический университет; 2022. С. 111–113.

Khanina YuA, Alibekov SY. Protective Polymer Coatings for Pipelines. Human security and sustainable development of society in the face of challenges of global transformations. In: Proceedings of the International Interdisciplinary Scientific Conference *"Human security and sustainable development of society facing the challenges of global transformations"*. Yoshkar-Ola: Publishing House of Volga State University of Technology; 2022. P. 111–113. (In Russ.).

9. Харисов Р.А., Гаскаров А.И., Мустафин Ф.М. Анализ причин возникновения дефектов защитных покрытий трубопроводов. *Нефтегазовое дело*. 2009;7(2):106–111.

Kharisov RA, Gaskarov AI, Mustafin FM. Analysis of the Reasons of the Origin Defectes Defensive Covering Pipe Line. *Petroleum Engineering*. 2009;7(2):106–111. (In Russ.).

10. Solovyova VA, Almukhammadi KH, Badegaish VO. Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review. *Materials.* 2023;16(5):1795. https://doi.org/10.3390/ma16051795

11. Богатов М.В., Юдин П.Е., Амосов А.П. Применение внутренних многофункциональных покрытий насосно-компрессорных труб для защиты от образования асфальтосмолопарафиновых отложений. *Нефтегазовое дело*. 2023;21(3):149–160. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-3-149-160

Bogatov MV, Yudin PE, Amosov AP. The Use of Internalmultifunctional Coatings for Pump And Compressor Pipes to Protect against the Formation of Asphalt, Resin and Paraffin Deposits. *Petroleum Engineering*. 2023;21(3):149–160. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-3-149-160 (In Russ.).

12. Ракова Т.М., Козлова А.А., Нефедов Н.И., Лаптев А.Б. Исследование влияния органических и неорганических ингибиторов на коррозионное растрескивание высокопрочных сталей. *Труды ВИАМ.* 2017;6(54):102–110.

Rakova TM, Kozlova AA, Nefedov NI, Laptev AB. The Study of Influence Organic and Inorganic Corrosion Inhibitors on the Stress-Corrosion Cracking High-Strength Steels. *Proceedings of VIAM.* 2017;6(54):102–110. (In Russ.).

13. Yudin P, Petrov S, Maximuk A, Knyazeva Zh. Destruction Mechanisms and Methods of Laboratory Autoclave Tests of Internal Coatings of Oil Pipes. *Corrosion in the Oil & Gas Industry.* 2019:121;01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912101009

14. Гареев А.Г., Ризванов Р.Г., Насибуллина О.А. *Коррозия и защита металлов в нефтегазовой отрасли.* Уфа: Гилем, Башк. энцикл. 2016. 352 с.

Gareev AG, Rizvanov RG, Nasibullina OA. *Corrosion and Protection of Metals in the Oil and Gas Industry.* Ufa: Gilem, Bashkir Encyclopedia. 2016. 352 p. (In Russ.).

15. Латыпов О.Р. *Эксплуатация нефтегазового оборудования в агрессивных средах.* Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет; 2018. 151 с.

Latypov OR. *Operation of Oil and Gas Equipment in Aggressive Environments.* Ufa: Ufa State Petroleum Technological University Publishing House: 2018. 151 p. (In Russ.).

16. Юдин П.Е., Петров С.С., Князева Ж.В., Андриянов Д.И., Сургаева Е.С. Причины преждевременного разрушения труб с внутренним антикоррозионным покрытием в нефтегазодобывающей отрасли и методы их исследования. *Инженерная практика.* 2021:10(21):16–23.

Yudin PE, Petrov SS, Knyazeva ZhV, Andrianov DI, Surgaeva ES. Causes of Premature Destruction of Pipes with Internal Anticorrosive Coating in the Oil and Gas Industry and Methods of Their Research. *Inzhenernaya praktika.* 2021;10(21):16–23. (In Russ.).

Об авторах:

Екатерина Сергеевна Сургаева, аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443001, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская 133), научный сотрудник ООО «НПЦ «Самара» (443022, РФ, г. Самара, ул. Гаражный проезд 3Б), ORCID, gavriluk@npcsamara.ru

Павел Евгеньевич Юдин, кандидат технических наук, доцент Самарского государственного технического университета (443001, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская 133), директор по науке ООО «НПЦ «Самара» (443022, РФ, г. Самара, ул. Гаражный проезд 3Б), SPIN-код: 3901-0458, ORCID, ScopusID, yudin@npcsamara.ru

Александр Петрович Амосов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443001, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская 133), SPIN-код: 3429-5946, ORCID, ScopusID, ResearcherID, egundor@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Е.С. Сургаева — сбор и подготовка материала, проведение экспериментальных исследований, описание результатов исследований и оформление научной статьи.

П.Е. Юдин — формирование основной концепции, цели и задачи исследований, формулировка выводов.

А.П. Амосов — научное руководство, обсуждение результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 14.03.2024
Поступила после рецензирования 03.04.2024
Принята к публикации 11.04.2024

About the Authors:

Ekaterina S. Surgaeva, Postgraduate Student of the Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department, Samara State Technical University (133, Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443001, RF), Researcher at Samara Scientific and Production Center LLC (3Б, Garazhny Proezd Str., Samara, 443022, RF), ORCID, gavriluk@npcsamara.ru

Pavel E. Yudin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Samara State Technical University (133, Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443001, RF), Director of Science at Samara Scientific and Production Center LLC (3Б, Garazhny Proezd Str., Samara, 443022, RF.), SPIN-код: 3901-0458, ORCID, ScopusID, yudin@npcsamara.ru

Aleksandr P. Amosov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department, Samara State Technical University (133, Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443001, RF), SPIN-код: 3429-5946, ORCID, ScopusID, ResearcherID, egundor@yandex.ru

Claimed Contributorship:

ES Surgaeva: collection and preparation of the material, conducting experimental research, description of the research results, design of the scientific article.

PE Yudin: formulation of the basic concept, goals and objectives of research, formulation of the conclusions.

AP Amosov: academic advising, discussion of the research results, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 14.03.2024
Revised 03.04.2024
Accepted 11.04.2024